

Research & Experimentation

design

## INVOLUCRI RESPONSIVI: SPERIMENTAZIONI CON MODELLI A COMPORTAMENTO NATURALE *RESPONSIVE ENVELOPES: EXPERIMENTATIONS BY NATURAL ROLE MODELS*

Ingrid Paoletti\*

**ABSTRACT** - Il saggio indaga la possibilità di sviluppare involucri responsivi partendo dai modelli di comportamento della natura, che li adotta a seconda degli stimoli esterni (umidità, sole, calore) e in relazione alla propria forma. In Architettura la possibilità di sviluppare tali involucri nasce dall'esigenza di modulare le prestazioni del primo filtro tra interno ed esterno con soluzioni dinamiche che possano essere attivate a seconda delle persone presenti nell'ambiente, delle modificazioni climatiche o della presenza di particolari condizioni. Studiare i modelli della natura può sviluppare soluzioni tecniche innovative, ampliando allo stesso tempo il bagaglio conoscitivo del progettista, grazie anche alle tecniche di progettazione computazionali, che consentono di informare matematicamente il disegno delle soluzioni e simularne il comportamento. Il paper illustra la sperimentazione svolta presso il Politecnico di Milano, che riguarda un prototipo di involucro pneumatico responsivo, studiato a partire dai modelli naturali e realizzato con tecniche sia di stampa additiva che di formatura.

This paper aims at investigating the possibility to design responsive envelopes starting from the role models of nature. Nature adopts very interesting role models depending on external stimuli and in relation to its own form. For example, the tactical, tropical and nastic movements respond to stimuli like humidity, sun and heat. In Architecture, the ability to develop responsive envelopes arises from the need to modulate the performance of the first filter between inside and outside with dynamic solutions that can be activated depending on people, climatic changes or the presence of particular conditions. The ability to modulate performance goes in the direction of more and more sustainable solutions that can reduce the amount of material and at the same time adapt to the environmental context in which they are positioned. Studying nature models can develop innovative technical solutions, while expanding the designer's know-how, thanks to computational design techniques, which help to mathematically inform the design of solutions and simulate their behaviour. An experimental prototype carried out at the ABC department of the Politecnico di Milano University, ACTLAB research unit, will show the realization of a responsive pneumatic envelope studied from the models of nature and produced either with additive and forming techniques.

**KEYWORDS:** *Involucri responsivi, modelli di comportamento naturale, sistemi costruttivi sperimentali.*

Responsive envelopes, nature role models, experimental construction systems, prototyping.

L'ambiente naturale è spesso stato considerato in antitesi con l'ambiente costruito, il primo dinamico, turbolento e in continua evoluzione, il secondo statico e prevedibile. La necessità di realizzare edifici eco-compatibili, che rispondano alla cogente questione della sostenibilità ambientale, ha incoraggiato tuttavia ricercatori e progettisti nella ricerca di soluzioni atte a mitigare le condizioni ambientali, cercando un modo responsivo, ossia non statico, di affrontare correttamente il rapporto tra le oscillazioni climatiche e le necessità quotidiane di calore, illuminazione e umidità (Lehman, 2016). La conseguente percezione dell'edificio come mediatore tra condizioni esterne e interne, un filtro intermedio soggetto a pressioni e forze indotte sia dall'ambiente che dagli stessi occupanti, ha posto le basi per la ricerca di soluzioni architettoniche responsive tipiche della natura. Di fatto gli esseri viventi sono esposti allo stesso ambiente e immersi nel medesimo clima; risulta quindi molto interessante cercare di capire quali modelli di comportamento adotta la natura, per simularne gli effetti anche nell'ambiente costruito. Sfruttando formule della biologia e fondendole in un approccio integrato con le potenzialità della computazione digitale, della tecnologia, dell'ingegneria e della scienza dei materiali, ci viene offerta oggi un'opportunità unica di creare ambienti performativi reali con un minimo o nessun input energetico.

*I modelli di comportamento della natura* - Il movimento negli organismi viventi è una delle caratteristiche principali che permettono loro di sopravvivere, mantenersi e riprodursi. Per fare ciò la natura adotta una modalità di riorganizzazione morfologica strutturale e materiale, avviata dagli stimoli esterni, che le permette di evolvere in forme responsive non permanenti. La natura infatti adotta modelli di comportamento molto interessanti a seconda degli stimoli esterni a cui è sottoposta, in relazione alla propria forma, attraverso il movimento. Il movimento è il fenomeno principale in base al quale la natura assicura la sopravvivenza, la riproduzione e l'adattamento, pure essendo radicata al suolo. Questi modelli possono essere semplificati e adattati per capirne la potenzialità in architettura e nelle costruzioni, indagando i corretti meccanismi di movimento, di fondamentale importanza per la produzione di soluzioni adattabili a bassa tecnologia. Le piante forniscono

molte esempi illustrativi di meccanismi di movimento in grado non solo di realizzare questo cambiamento responsivo, ma anche di organizzare il passaggio di fluidi tra gli elementi immobili in una configurazione strutturale dinamica. Ciò è dovuto anche alla consistenza mono-materica delle piante, che evitando la composizione multi-materica e il giunto tra stabile e mobile, permette di reagire agli stimoli esterni in modo veloce, generando una risposta in tempo reale (Lehman, 2016).

Di fatto gli involucri responsivi vengono definiti come involucri capaci di reagire a stimoli esterni attraverso il comportamento di un materiale continuo, che basa la propria distorsione su membri flessibili (Schleicher, 2016). Ciò consente l'integrazione di diverse funzioni all'interno di pochi elementi, sfruttando così la proprietà di elasticità del materiale scelto, dove il meccanismo di movimento svolge diverse azioni come l'articolazione della forma, la direzionalità dello spostamento, l'immagazzinamento e il rilascio di energia senza i problemi tipici del cinematismo, quali rumore, vibrazioni e necessità di manutenzione. I meccanismi elastici sono in grado di sopportare la fatica o la potenziale usura, che di solito tende a verificarsi nello sfregamento di sistemi convenzionali rigidi che necessitano anche di lubrificazione, essendo minacciate dall'ambiente (Howell et al., 2013).

Poiché l'edificio è anch'esso un organismo artificiale sottoposto alle condizioni ambientali esterne e ai cambiamenti nel tempo, ci interessa qui analizzare i tipi di movimenti della natura per adottare i principi di questo approccio biomimetico nei sistemi di involucro responsivi. Ciò è possibile oggi grazie anche al velocissimo avanzamento nelle tecniche di progettazione computazionali, che permettono di incorporare informazioni sul materiale e sul suo comportamento strutturale sin dalle prime fasi del disegno. I movimenti che possiamo evidenziare, e che per analogia poi possono essere utilizzati per l'architettura, sono il movimento *tattico*, quello *tropico* e quello *nastico*; in ognuno di questi movimenti, lo stimolo determina la reazione e la sua intensità, che viene chiamato 'tempo di reazione' e che varia a seconda del tempo necessario per adattarsi alla variazione di ambiente (Fig. 1). Il movimento *tattico* (dal greco *tassi*, arrangiamento) è quello che implica il movimento di un intero organismo; in questo caso l'impianto non è legato a una posizione specifica e può eseguire un movimento indipendente completamente libero, in

grado di muoversi da un luogo all'altro in risposta a fattori esterni. In relazione alla loro mobilità, gli organismi possono orientarsi verso tassi positivi o negativi dalla fonte dello stimolo; possiamo identificare tre tipi di movimenti tattici: *fototassi*, *termotassi* e *chemiotassi* a seconda dell'impulso che incita la reazione. Tali locomozioni sono osservate ad esempio in piante ciliate, alghe unicellulari, gameti e zoospori (Gupta, n.d.).

La *fototassi* è la traslazione direzionale dell'intero organismo in risposta allo stimolo della luce: può essere positiva o negativa a seconda dell'intensità della luce. La *termotassi* è il movimento osservato in risposta a un gradiente di temperatura, con conseguente traslazione contro o verso l'incremento di calore. La *chemiotassi* è una risposta nutrizionale e di sopravvivenza che rende gli organismi in grado di individuare variazioni chimiche nell'ambiente e quindi di fornire cibo per la sopravvivenza. Questo meccanismo consente ai batteri o ad altri organismi monocellulari o multicellulari di ottenere glucosio o di raggiungere ossigeno o di allontanarsi per esempio da sostanze velenose. I *tropismi* (dal greco *troposì*, 'svolta') sono movimenti eseguiti solo da una parte o da un organo specifico di una pianta. La deformazione, la rotazione o la flessione si verifica in relazione alla direzione dello stimolo con un movimento di un certo angolo (Gupta, n.d.); tale fenomeno si verifica principalmente a causa di una crescita differenziale e viene definito 'tropismo positivo', se

la locomozione si allontana dallo stimolo, 'tropismo negativo', se si avvicina (Ameen, 2011).

Generalmente i tropismi sono movimenti piuttosto lenti e comportano un cambiamento di lunga durata a causa del comportamento irreversibile della crescita. A seconda del fattore che innesca il movimento sono differenziati sette tipi di movimenti tropici che vengono qui descritti molto brevemente. Il *termotropismo* è la predisposizione degli organi della pianta a spostarsi verso o lontano da un incremento di temperatura. Un esempio comune è il piegarsi delle foglie a freddo come il fenomeno osservato nella pianta di rododendro (Gowthami, 2014). Il *fototropismo* è chiaramente un movimento che coinvolge l'orientamento di una pianta in risposta a uno stimolo luminoso; la reazione può essere guidata solo da una certa quantità di luce presente per una durata specifica del tempo e, come visto in precedenza, per altri movimenti può essere positivo o negativo. Questo fenomeno è forse quello che ha catturato maggiormente l'attenzione dei ricercatori, da Darwin in poi, per comprendere e sperimentare la crescita in base alla distribuzione della luce e dello sviluppo dell'ossigeno.

L'*eliotropismo* si riferisce chiaramente alla reazione alle dinamiche del sole: come non citare i girasoli che tracciano la posizione del sole da est a ovest (dia-eliotropismo), mentre ci sono piante che - al contrario - si chiudono il giorno per reagire alla notte (para-eliotropismo)? Il *geotropismo* è un movimento organico della pianta attivato dal rile-

vamento del campo gravitazionale della terra: la risposta può essere diretta con l'orientamento verso il basso, come osservata nelle radici, o verso l'alto, come dimostrato dai germogli. Il segnale che provoca il meccanismo è probabilmente dovuto alla chimica della membrana cellulare che si stabilizza quando trova la posizione finale (Vandenbrink et al., 2014). L'*idrotropismo* è un movimento manifestato in risposta a gradienti di acqua o di umidità; le radici sono note per essere 'idrotroscopiche' positivamente a causa della loro crescita verso la fonte di umidità, mentre gli 'sporangifori' per esempio presentano idrotropismi negativi. Infine il *chemiotropismo* è il movimento di una struttura vegetale attivata da uno stimolo chimico: questo fenomeno si osserva durante l'impollinazione quando le sostanze chimiche rilasciate nello stilo del fiore attiveranno la produzione di polline. Per ultimi possiamo evidenziare i movimenti *nastici*, che sono svolti da una parte di pianta stazionaria, in risposta a un determinato stimolo esterno indipendente dalla sua direzione, il che significa che l'organo è influenzato ugualmente da tutti i lati.

Questi meccanismi di movimento sono abbastanza veloci e consentono un rapido adattamento dell'organismo alle perturbazioni esterne. A differenza dei tropismi, essi sono reversibili e regolati da strutture articolate che agiscono sulle loro opzioni di mobilità (Bar-Cohen, 2006). I movimenti rapidi si verificano generalmente a causa dell'osmosi e del cambiamento di pressione che



Fig. 1, 2 - A sinistra: schema dei modelli di comportamento in natura. A destra: schema delle diverse scale a cui possono essere eseguiti i movimenti di esseri viventi in natura.

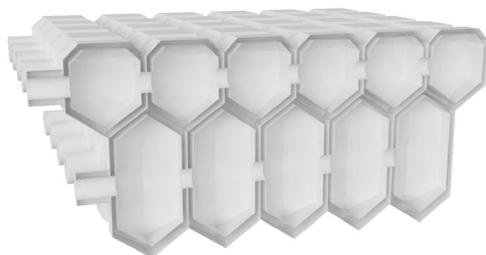


Fig. 3 - Progettazione della geometria delle cellule a curvature programmate per l'involucro responsivo.

provoca l'acqua, lasciando entrare umidità nelle cellule vegetali e provocando così il loro rigonfiamento o la rugiada (Schleicher, 2016). L'assorbimento o la perdita di acqua dalla cellula possono portare a trasformazioni significative nelle piante. Alcuni di essi possono essere provocati solo da un cambiamento nelle condizioni di umidità (*Fern Sporangium*) mentre altri richiedono una notevole umidificazione per fornire la risposta attesa (capsule di semi di piante di ghiaccio per esempio). In entrambi i casi uno stimolo dall'ambiente è in grado di produrre una trasformazione visibile a occhio nudo in un certo numero di secondi. Le dinamiche di movimento esaminati in precedenza possono essere rilevati dalla micro, alla media, alla macroscale, mostrando la trasformazione delle piante in termini di configurazione strutturale, morfologica e materiale a diversi livelli (Fig. 2). Dall'analisi di questi 'modelli di comportamento' è scaturito il progetto di un involucro responsivo pneumatico sperimentale presso l'Unità di Ricerca ACTLAB, Dipartimento ABC del Politecnico di Milano, coordinata dall'autrice del presente articolo, con la collaborazione di Maya Zheliakova e Bilyana Savova.

*Un progetto di involucro responsivo* - Le caratteristiche comportamentali, geometriche e monomateriche evidenziate precedentemente sono diventate la base conoscitiva per il progetto di una membrana responsiva, attraverso la progettazione computazionale e la sperimentazione fisica successiva. Il gruppo di ricerca ACTLAB ha sviluppato un sistema che potesse corrispondere alle logiche biologiche espresse sopra, adattandone i principi. Nello specifico si è scelto di unire la possibilità di rispondere a un stimolo con la capacità di movimento azionata da un utente ma con un minimo quantitativo di energia. Per questo motivo la scelta è ricaduta sullo stimolo umidità e sulle membrane pneumatiche, che consentono di mantenere quella mono-materialità di cui parlavamo in precedenza e che consente una reazione flessibile all'ambiente. Analizzando il regno vegetale e soprattutto gli esempi considerati, si può notare che l'assorbimento dell'acqua rappresenta un fattore potente per la generazione del movimento che può indurre trasformazioni significative in una piccola quantità di tempo e senza bisogno di energia. La trasformazione della forma è stata ipotizzata con pressione di aria, scelta come uno stimolo interno controllato dall'utente a seconda delle esigenze delle attività all'interno dell'ambiente.

La soluzione proposta cerca quindi di integrare la funzionalità del sistema con la comunicazione costante con l'ambiente. Tenendo conto di queste ipotesi è stata progettata una struttura a due

strati con una composizione cellulare differenziata sul lato esterno e sul lato interno. Su ispirazione della 'pianta danzante', il movimento è ottenuto grazie alla geometria diversa delle cellule che si piegano secondo direzionalità predefinite, dovute alla differenza di turgore nella zona superiore e inferiore. In questo modo vengono definite due aree la cui pressione differenziata è in grado di produrre cambiamento nella geometria e nello spostamento dell'involucro verso o contro lo stimolo, raggiungendo una deformazione critica che non viene mai superata; il cambio di stimolo o la cessazione da parte dell'utente dell'azione pneumatica permette così di tornare alla posizione iniziale senza deformazione. Le geometrie delle cellule su entrambi i lati della membrana sono pensati come esagoni semplici equilaterali, considerati come una forma ideale per un impianto di insufflaggio efficace, adattati e articolati per ottimizzare il loro comportamento in base ad una quantità molto bassa di energia. Lo strato esterno della membrana è ispirato alle cellule anulose del *Sporangium Fern*, con un sottile cappuccio laterale che consente l'interazione con l'ambiente e aiuta la curvatura programmata.

Lo strato interno ha una geometria a nido d'ape allungato, simile alla capsula di semi della pianta di ghiaccio, che è in grado di generare espansioni predominanti, a causa del comportamento anisotropo. Le due membrane condividono una parete per ottenere il movimento responsivo e un controllo del movimento compatto e non dispersivo (Fig. 3). Inoltre, la geometria poliedrica delle cellule sia nello strato interno che nello strato esterno provoca un'espansione multidirezionale dell'involucro, che ha come conseguenza una doppia curvatura della struttura (Fig. 4). L'espansione del livello esterno dell'involucro è guidato in modo pneumatico dall'azione dell'umidità attraverso un'ottimizzazione computazionale del disegno della struttura. Sono state realizzate diverse simulazioni per comprendere la geometria idealmente preferita e la consistenza della membrana e verificare la traiettoria di moto; nell'ipotesi finale la geometria delle cellule è stata variata in modo da avere una cellula più piccola e compatta e una cellula esagonale allungata, che permettessero il movimento desiderato attraverso le deformazioni ottenute dalla pressione sulla combinazione di strati funzionali, ma anche sulle deformazioni dovute alla pressione sulla combinazione di uno strato sull'altro.

La geometria del lato interno della membrana

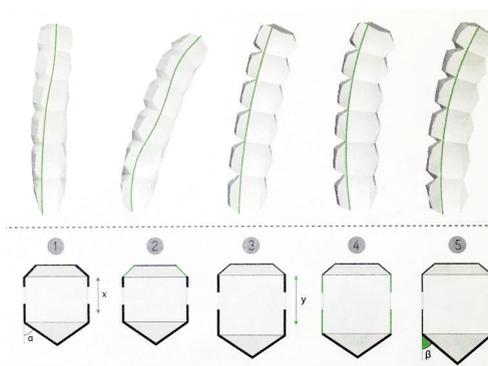


Fig. 4 - Visualizzazione della curvatura dell'involucro cellulare ottenuto con software computazionali.

utilizza il principio a nido d'ape per avere un'espansione anisotropica dopo l'allungamento in una specifica direzione della cella; come osservato da diverse simulazioni questo principio è perfettamente mantenuto, con un aumento della lunghezza della cella nella direzione del 68%, quasi il doppio del numero ottenuto con la geometria regolare. Ciò suggerisce che questa forma può fornire curvature rilevanti quando è collegata all'altra senza la necessità di una differenziazione di materiale che può richiedere un processo produttivo più complesso o di variazione di pressione nelle due cavità. Di conseguenza le simulazioni hanno confermato l'ipotesi e hanno contribuito a stabilire due geometrie di aspetto diverso a seconda della loro trasformazione finale. Sono state eseguite anche simulazioni per comprendere la scalabilità della geometria: il test ha dimostrato che un aumento della dimensione 1,5 volte porta a una maggiore espansione della pneumaticità raggiungendo un ingrandimento del 115 per cento della dimensione originale degli esagoni allungati. Naturalmente, le dimensioni più grandi implicano costi e sfide di fabbricazione più elevate, ma i risultati ottenuti sono stati fondamentali per comprendere la possibilità di realizzare il sistema.

Si può osservare che lo strato interessato si muove con un'ipotetica pressione dell'umidità dopo un minuto e mezzo, tempo decisamente contenuto per ottenere una reazione a basso impatto energetico. Riassumendo tutte le fasi progettuali si può riconoscere come da tutte le fasi di ottimizzazione eseguite, è riconoscibile che con piccoli cambiamenti nella geometria e nella distribuzione dei materiali si possono ottenere risultati di curvatura molto variabile. Osservando gli effetti di torsione prodotti in alcune delle prove iniziali possiamo concludere che altre forme convesse e concave possono essere ottenute cambiando l'articolazione delle cellule; ad esempio, la struttura a due strati può essere integrata in un sistema multicomponente in cui ogni elemento ha le sue caratteristiche geometriche e materiali uniche in grado di produrre una curvatura programmata specifica. Così la stessa quantità di pressione distribuita da un lato o dall'altro, può generare un gradiente di deformazione o aperture molto variabili. Infine, anche la dimensione dei fori, attraverso i quali l'aria passa, può essere variata al fine di produrre regioni di maggiore pressione e, di conseguenza, anche di tipi d'involucro responsivo.

*Il prototipo sperimentale* - Alla parte progettuale non poteva mancare una sperimentazione reale per verificare i principi enucleati nella parte di studio dei movimenti della natura. La prima considerazione è stata la necessità di realizzare un prototipo di involucro che avesse delle parti vuote e capire quale strategia costruttiva potesse permettere il movimento; la precisione è un fattore cruciale per ogni fase del processo a causa del movimento millimetrico. Tenendo conto delle considerazioni precedenti sono state individuate nella stampa additiva e nella creazione di stampi, le due tecniche produttive atte a realizzare il prototipo finale e dimostrare la funzionalità della membrana. La generazione della struttura cellulare vuota esterna richiede dunque la fabbricazione additiva, mentre i vuoti interni necessitano di avere stampi che consentano poi il getto del materiale finale. Il materiale scelto è il silicone che consente di verificare facilmente

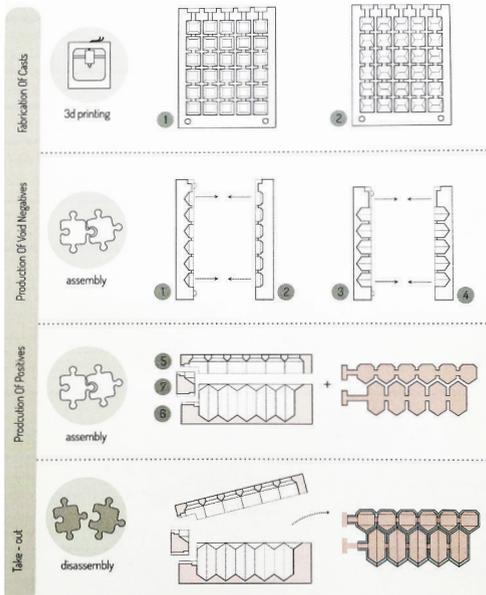


Fig. 5 - Schema della fabbricazione del sistema dell'involucro responsivo sperimentato con cellule esagonali.

la flessibilità e le potenzialità della distorsione del sistema di involucro (Fig. 5).

La sperimentazione iniziale ha comportato l'impiego di una stampa 3D per la creazione dello stampo esterno e dello stampo per il posizionamento dello stampo dei vuoti (Fig. 6); di conseguenza, il silicone è stato versato nella forma dei vuoti e dopo la polimerizzazione è stato appeso verticalmente su di un lato esterno, per evitare la generazione del foro sull'ultima cella della membrana; infine, il silicone per i positivi è stato gettato lentamente riempiendo la distanza tra le due strutture. La tecnica della stampa 3D è risultata coerente, precisa ed efficace per lo scopo previsto, mentre l'estrazione dei vuoti negativi in silicone si è rilevata impossibile senza il taglio delle cellule.

Quindi la stessa forma è stata utilizzata per i negativi, ma questa volta è stata versata cera all'interno. Tuttavia, la rimozione della cera, che è un materiale fragile, ha generato difficoltà e rotture. Di conseguenza, un ulteriore passo è stato aggiunto al processo di produzione, includendo una colata di silicone con diverso tempo di vulcanizzazione per potere estrarre gli stampi. Questa differenziazione si è rivelata una tecnica di grande successo e alla fine ha dato i risultati attesi. Dopo aver sciolto la cera contenuta all'interno della geometria positiva, il piccolo prototipo è stato gonfiato e ha confermato l'efficacia delle fasi successive che stabiliscono il processo di fabbricazione per la produzione di un prototipo finale (Fig. 7). Sia la forma degli interni (negativi) che le cellule esterne sono state variate attraverso le prove empiriche, mirando alla creazione di una morfologia più appropriata in base al tipo di fabbricazione e alla posizione degli stampi. A esempio, il versamento della cera è stato inizialmente eseguito in una posizione verticale che ha richiesto la creazione di una forma di cellula più aerodinamica per consentire un facile flusso del materiale (Fig. 8).

Così è stato infatti osservato che la relazione tra la forma cellulare e la geometria del getto esterno è di cruciale importanza per l'efficace estrazione della struttura finale. La scelta di una forma di cellule leggermente arrotondata invece di una rigi-

da necessità di un'attenta manipolazione del getto per essere estraibile. Il rapporto equilibrato tra resistenza materiale ed elasticità è stato un fattore importante da considerare nel processo di fabbricazione. Il tipo di silicone usato nel processo iniziale si è rivelato importante per creare una struttura piuttosto rigida, che non ostacolasse però la possibilità di insufflazione; pertanto, è stato scelto un materiale con spessore inferiore (10 mm) e un tempo di vulcanizzazione più veloce (2h), ma in questo caso la resistenza ( $12 \text{ N} / \text{mm}^2$ ) è risultata insufficiente e il tempo di lavoro limitato ha ostacolato la distribuzione appropriata dei materiali. Infine, è stata condotta una prova con un silicone di polimerizzazione a 24 ore con un'elevata resistenza di  $20 \text{ N} / \text{mm}^2$ , che ha creato un risultato altamente flessibile, simultaneamente resistente e facilmente gonfiabile. L'alterazione del materiale attraverso i test è stata combinata con la variazione dello spessore cellulare che determina anche l'elasticità (Fig. 9).

**Conclusioni** - I modelli della natura vengono spesso presi a riferimenti solo da un punto di vista formale, perdendo invece la complessità e profondità delle formule biologiche, matematiche e geometriche che sottendono, per esempio, il movimento in natura. Il progetto realizzato presso l'unità di ricerca ACTLAB del dipartimento ABC e il contributo della tesi di Byliana Savova dimostrano invece che la quantità di informazioni che possono essere selezionate e applicate per lo sviluppo di un sistema costruttivo quale l'involucro, ma anche di altri possibili sistemi costruttivi, è tale da poter progettare con i comportamenti della natura. Tali comportamenti risultano tra l'altro spesso molto efficienti in termini di uso delle risorse, garantendo che i sistemi costruttivi sperimentali ipotizzati non necessitano di elevate quantità di energia per attivare la capacità responsiva e possano essere completamente personalizzabili (Naboni, Paoletti, 2015).

#### ENGLISH

*Natural environment has often been considered in antithesis with the built environment, the first being dynamic, turbulent and evolving, the second one static and predictable. The need to build eco-friendly buildings that respond to the relevant environmental sustainability issue has, however, encouraged researchers and designers to find solutions to mitigate environmental conditions by seeking a responsive, non-static way of addressing the relation between the climatic oscillations and the daily necessities of heat, lighting and humidity (Lehman, 2016). The resulting perception of the building as a mediator between external and internal conditions, an intermediate filter subject to pressures and forces induced by both the environment and the occupants themselves, laid the foundations for the search for nature-friendly architectural solutions. In fact, living beings are exposed to the same environment and immersed in the same climate, and it is therefore a very interesting research to understand which behaviours nature adopt, to simulate its effects also in the built environment. By using biology formulas and merging them into an integrated approach with the potential of digital computing, technology, engineering, and material science, a unique opportunity is offered to create realistic performance environ-*

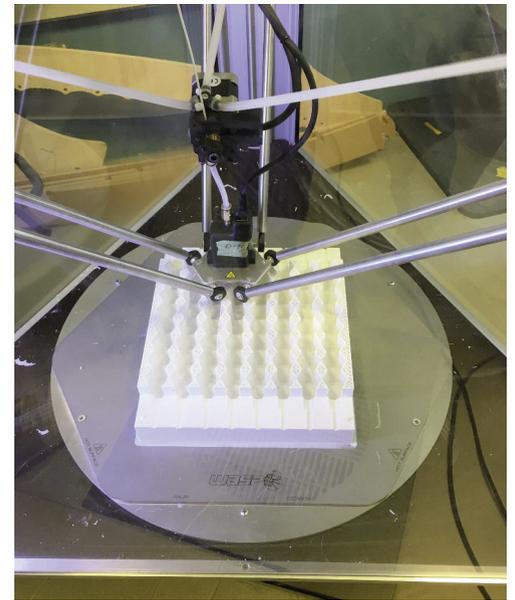


Fig. 6 - Produzione di uno degli stampi con tecniche di fabbricazione additiva.

*ments with minimal or no energy input.*

*Natural role models - Movement in living organisms is one of the main features that allow them to survive, maintain, and reproduce. To do this, nature adopts a model of structural and material morphological reorganization, initiated by external stimuli, which allows them to evolve in non-permanent responsive forms. Nature, in fact, adopts very interesting role models depending on the external stimuli to which it is subjected, in relation to its form, through movement. Movement is the main phenomenon that nature provides for survival, reproduction, and adaptation, even though it is rooted in the ground. These models can be simplified and adapted to understand their potential in architecture and construction by investigating the correct motion mechanisms, which are of crucial importance for the production of low-tech adaptive solutions. Plants not only provide many illustrative examples of motion mechanisms that can accomplish this responsive change but also arrange the flow of fluid between the elements in a dynamic structural configuration. This is also due to the mono-material texture of the plants, which by avoiding the multi-material composition and the joint between the stable and the mobile, allows to react to external stimuli in a fast way, generating a real-time response (Lehman, 2016).*

*In fact, responsive envelopes are defined as capable of reacting to external stimuli by the behaviour of a continuous material that bases its own distortion on flexible members (Schleicher, 2016). This allows the integration of several functions within a few elements, thus exploiting the elasticity properties of the chosen material, where the motion mechanism performs different actions such as shape articulation, directional displacement, storage and release of energy without the typical problems of kinematics such as noise, vibration and maintenance necessity. Elastic mechanisms can withstand fatigue or wear potential, which usually tends to occur in the rubbing of rigid conventional systems that also require lubrication, being threatened by the environment (Howell et al., 2013).*

*Since the building is also an artificial body sub-*

jected to external environmental conditions and changes over time, we are interested in analyzing the types movements nature adopt in terms of principles for a biomimetic approach to responsive envelope systems. This is possible today thanks to the rapid advancement in computational design techniques that allow to incorporate information on the material and its structural behaviour from the very beginning of the design. The movements we can highlight, and which by analogy can then be used for architecture, are the tactical, tropic and nastic movements. In each of these, the stimulus determines the reaction and its intensity, which is called reaction time and which varies depending on the time it takes to adapt to the environment variation (Fig. 1).

The tactical movement (from Greek taxi, 'arrangement') is what implies the movement of an entire body. In this case, the plant is not tied to a specific location and can perform a completely free independent movement, able to move from one place to another in response to external factors. With regard to their mobility, organisms can be oriented towards positive or negative rates from the source of the stimulus. We can identify three types of tactical movements: phototassi, thermotassi and chemotaxi depending on the impulse that induces the reaction. Such locomotions are observed for instance in ciliate plants, unicellular algae, gametes and zoospori (Gupta, n.d.).

Phototassi is the directional translation of the whole organism in response to the light stimulus: it can be positive or negative depending on how light intensity is. Thermotassi is the motion observed in response to a temperature gradient, resulting in translation against or towards the increase of heat. Chemotaxi is a nutritional and survival response that makes organisms able to detect chemical variations in the environment and thus provide food for survival. This mechanism allows bacteria or other monocellular or multicellular organisms to obtain glucose or to reach oxygen or to move away from, for example, poisonous substances. Tropisms (from the Greek troops, 'turning') are movements performed only by one part or by a specific organ of a plant. Deformation, rotation or flexion occurs in relation to the direction of the stimulus with a movement of a certain angle (Gupta, n.d.). This phenomenon occurs mainly due to differential growth and is called positive tropism, locomotion moves away from the stimulus, negative tropism, if approaching (Ameen, 2011).

Generally, tropisms are rather slow movements and result in a long-lasting change due to irreversible growth behaviour. Depending on the factor

triggering the movement, there are seven types of tropical movements that are described here very briefly. Thermotropism is the predisposition of plant organs to move to or away from a rise in temperature. A common example is the folding of cold leaves as the phenomenon observed in the rhododendron plant (Gowthami, 2014). Phototropism is clearly a movement that involves the orientation of a plant in response to a bright stimulus. The reaction can only be guided by a certain amount of light present for a specific duration of time and as previously seen for other movements it may be positive or negative. This phenomenon is perhaps one that has caught the attention of researchers from Darwin onwards to understand and experience growth based on light distribution and oxygen development.

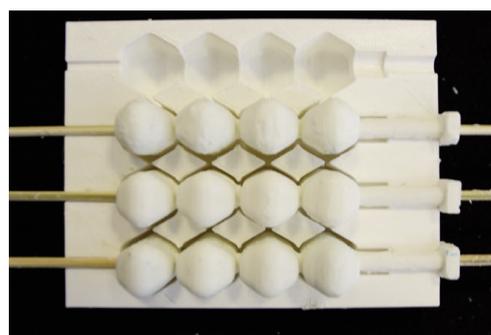
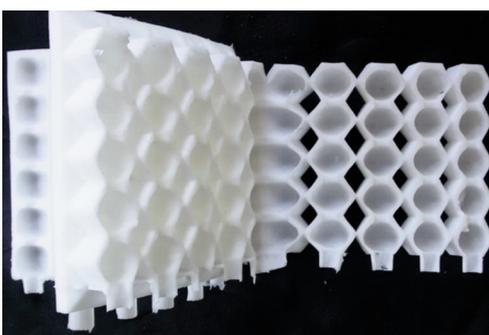
Elitotropism clearly refers to the reaction to the sun's dynamics, not to mention the sunflowers that trace the sun's position from east to west (diatropism), while there are plants that - on the contrary - close the day to react to night (paraeliotropism). Geotropism is an organic movement of the plant triggered by the discovery of the gravitational field of the earth: the response can be directed downwardly as seen in the roots, or upwards as shown from sprouts. The signal that causes the mechanism is probably due to cell membrane chemistry that stabilizes when it finds the final position (Vandenbrink et al., 2014). Hydrotropism is a movement manifested in response to water or moisture gradients. Roots are known to be hydrothoscopically positively due to their growth towards the source of moisture, while sporangials for example exhibit negative hydrotropisms. Lastly, chemotropism is the movement of a chemical structure stimulated by a chemical stimulus: this phenomenon is observed during the pollination when the chemicals released into the flower stylus will activate the production of pollen. Lastly, we can point out the movements that are occurring from a stationary plant part in response to a particular external stimulation independent of its direction, which means that the organ is equally influenced by all sides.

These motion mechanisms are fast enough and allow a rapid adaptation of the body to external perturbations. Unlike tropisms, they are reversible and regulated by articulated structures acting on their mobility options (Bar-Cohen, 2006). Rapid movements generally occur due to the osmosis and the pressure change that causes the water to enter moisture into the plant cells and thus cause their swelling or rust (Schleicher, 2016). The absorption or loss of water from the cell can lead to significant

transformations in plants. Some of them can only be caused by a change in humidity (Fern Sporangium), while others require considerable humidification to provide the expected response (ice capsules for example). In both cases, a stimulus from the environment is able to produce a visible naked eye transformation in a number of seconds. The movement dynamics examined above can be detected by the micro, the average, the macro scale, showing the transformation of plants in terms of structural, morphological and material configuration at different levels. (Fig. 2) From the in-depth analysis of these 'behavioral models', the project of an experimental pneumatic responsive casing was produced at the ACTLAB Research Unit ABC Department of the Politecnico di Milano University.

The design of a responsive envelope - The behavioural, geometric and mono materials that have previously been highlighted have become the cognitive basis for the design of a responsive membrane through computational design and subsequent physical experimentation. At the Politecnico di Milano University, Department of ABC, ACTLAB research group, it was attempted to develop a system that would correspond to the biological logic expressed before, adapting its principles. Specifically, it was chosen to combine the ability to respond to a stimulus with a user-driven motion capability, but with a minimum amount of energy. For this reason, the choice is influenced by the humidity stimulation and the pneumatic membranes, which enable us to maintain that mono-materiality that we talked about earlier and which allows a flexible reaction to the environment. By analyzing the plants and above all the examples considered, water absorption is a powerful factor for the generation of motion that can induce significant transformations in a small amount of time and without the need for energy. Transformation of the form has been hypothesized with air pressure, chosen as a user-controlled internal stimulus depending on the needs of the activities within the environment. The proposed solution therefore seeks to integrate the functionality of the system with constant communication with the environment.

Taking into account these assumptions, a two-layer structure was designed with a differentiated cellular composition on the outside and on the inside. On the inspiration of the 'dancing plant', movement is obtained thanks to the different geometry of the cells that bend according to predefined directionality, due to the difference in turgor in the upper and lower regions. In this way, two areas are defined whose differential pressure is capable of



Figg. 7, 8 - Stampi in silicone per la realizzazione delle cellule e dei vuoti pneumatici.

Fig. 9 - Prototipo dell'involucro responsivo sperimentale.

producing change in geometry and displacement of the shell towards or against the stimulus, reaching a critical deformation that is never overcome. The stimulus change or the cessation by the user of the pneumatic action allows you to return to the starting position without deformation. Cell geometries on both sides of the membrane are thought of as simple equilateral hexagons, considered as an ideal form for an effective inflammation plant, adapted and articulated to optimize their behavior on the basis of a very low amount of energy. The outer layer of the membrane is inspired by the Sporangium Fern's annulus cells, with a thin side cap that allows interaction with the environment and helps with programmed curvature.

The inner layer has an elongated honeycomb geometry, similar to the ice cap seeds capsule, which is capable of generating predominant expansions due to anisotropic behaviour. The two membranes share a wall for responsive movement and a compact and non-dispersive motion control (Fig. 3). In addition, the polyhedral geometry of cells in both the inner layer and the outer layer causes a multidirectional expansion of the casing, resulting in a double curvature of the structure (Fig. 4). The expansion of the outer layer of the shell is pneumatically driven by the action of moisture through a computational optimization of the design of the structure. Several simulations have been carried out to understand the ideally preferred geometry and consistency of the membrane and verify the trajectory of motion. In the final hypothesis, the cell geometry has been varied to have a smaller and compact cell and an elongated hexagonal cell that allow the desired movement through the deformations obtained from the pressure on the combination of functional layers but also on the deformations due to the pressure on the combination of one layer on the other.

The geometry of the inner side of the membrane uses the honeycomb principle to have anisotropic expansion after stretching in a specific cell direction. As observed by different simulations this principle is perfectly maintained, with an increase in cell length in the 68% direction, almost twice the number obtained with regular geometry. This suggests that this shape can provide significant bends when connected to the other without the need for a differentiation of material that may require a more complex production process or pressure variation in the two cavities. Consequently, the simulations confirmed the hypothesis and helped to establish two different geometries depending on their final transformation. Simulations were also made to understand geometry scalability. The test has shown that a 1.5-fold increase in size leads to increased pneumatic expansion reaching a 115 percent magnification of the original size of elongated hexagons. Of course, the larger dimensions imply higher manufacturing costs and challenges, but the results obtained were fundamental to understanding the possibility of making the system.

It can be seen that the membrane moves with a hypothetical humidity pressure after a minute and a half, a time that is very low in order to get a reaction and a low energy impact. Summing up all the design phases, it is recognizable that with small changes in geometry and distribution of materials a very variable curvature results can be obtained. Observing the twist effects produced in some of the initial tests we can conclude that in addition to con-

vex and concave shapes can be obtained by changing the articulation of the cells. For example, the two-layer structure can be integrated into a multi-component system where each element has its unique geometric characteristics and unique materials that can produce a specific programmed curvature. So the same amount of pressure distributed on one side or the other can generate a very variable deformation gradient or apertures. Finally, the size of the holes through which the air passage can be varied in order to produce regions of higher pressure and consequently also of type of responsive envelope.

The experimental prototype - The design part could not miss of real experimentation to verify the principles enucleated in the study of the movements of nature. The first consideration was the need to make a prototype of membrane that had empty parts and to understand what constructive strategy could allow motion. Precision is a crucial factor for each phase of the process due to the millimetric movement. Taking into account previous considerations, two production technologies were identified to achieve the ultimate prototype and to demonstrate the membrane functionality: additive printing and mold making. The generation of the outer empty cell structure therefore requires additive manufacturing while the internal voids need to have molds that then allow the casting of the final material. The chosen material is the silicone that allows to easily verify the flexibility and potential of the wrapping system distortion (Fig. 5). Initial experimentation involved the use of 3D printing for the mold design and molds for positioning the empty mold (Fig. 6). Consequently, the silicone was poured into the form of the voids and after the polymerization was suspended vertically on an external side to prevent the hole from forming on the last membrane cell.

Finally, the silicone for the positive was thrown slowly by filling the distance between the two structures. The 3D printing technique was consistent, accurate and effective for the intended purpose, while the removal of the silicon negative voids was found impossible without the cut of the cells. So, the same shape was used for the negatives, but this time wax was poured inside. However, removal of wax, which is a fragile material, has caused difficulties and breaks. As a result, a further step was added to the production process, including a silicone casting with different vulcanization time to extract molds. This differentiation proved to be a highly successful technique and ultimately gave the expected results. After waxing the wax contained within the positive geometry, the small prototype was inflated and confirmed the success of the manufacturing process for the production of a final prototype (Fig. 7). Both the shape of the internal (negative) and the external cells have been varied through empirical tests, aiming at the creation of a more appropriate morphology based on the type of fabrication and mold position. For example, waxing was initially carried out in a vertical position that required the creation of a more aerodynamic cell form to allow easy flow of the material (Fig. 8).

It has been observed that the relation between the cellular shape and the external geometry is of crucial importance for the effective extraction of the final structure. The choice of a slightly rounded cell shape instead of a rigid was needed for careful cast manipulation to be removable. The balanced rela-

tionship between material strength and elasticity was an important factor to be considered in the manufacturing process. The type of silicone used in the initial process proved to be important in creating a rather rigid structure that did not, however, hinder the possibility of insufflation. Therefore, a material with a lower thickness (10 mm) and a faster curing time (2h) was chosen, but in this case the resistance (12 N / mm<sup>2</sup>) was insufficient and the limited working time hampered the distribution appropriate materials. Finally, a 24-hour polymerization silicone with a high strength of 20 N / mm<sup>2</sup> has been performed which has created a highly flexible, simultaneously durable and easily inflatable result. The alteration of the material through the tests was combined with the variation in the cellular thickness which also determines elasticity (Fig. 9).

Conclusions - Nature role models are often referred to only from a formal point of view, losing the complexity and depth of the biological, mathematical, and geometric formulas that underlie, for example, movement in nature. The project carried out at ABC's ACTLAB research unit and the contribution of Byliana Savova's thesis shows instead the amount of information that can be selected and applied for the development of a constructive system with a responsive envelope, but also of other possible constructive systems, designed with nature role models. These behaviours, among other things, are often very resource efficient, ensuring that the hypothesized experimental construction systems do not require high amounts of energy to activate responsive capacity and can be fully customizable (Naboni, Paoletti, 2015).

## REFERENCES

- Ameen, R. (2011), *Movement in plants (10th-Biology-Lesson-14.3) Part 1*. Accessed May 2. <http://www.desktopclass.com/notes/biology/movement-in-plants-10th-biology-lesson-14-3-part-1.html>.
- Bar-Cohen, Y. (2006), *Biomimetics: biologically inspired technologies*, Taylor & Francis, London.
- Gowthami, R., (2014), *Plant Intelligence [Power Point Slides]*.
- Harika, G., (2013), *Study Notes on Plant Movements (With Diagrams)*. <http://www.biologydiscussion.com/plants/plant-movement/study-notes-on-plant-movements-with-diagrams/18139>.
- Howell, L., Magleby, S.P., Olsen, B.M. (2013), *Handbook of Compliant Mechanisms*, Wiley.
- Lehman, M.L. (2016), *Adaptive Sensory Environments: An Introduction*, New York, Routledge.
- Naboni, R., Paoletti, I. (2015), *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer.
- Schleicher, S. (2016), *Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design*, PhD diss., Univ. of Stuttgart.
- Vandenbrink, J., Brown E., Harmer S., Blackman, B. (2014), "Turning heads: the biology of solar tracking in sunflower", in *Plant Science: An International journal of experimental plant biology*, 224: 20-6. Accessed April 13. doi: 10.1016/j.plantsci.2014.04.006.

Acknowledgments - Thanks to the contribution of Bilyana Savova bachelor thesis, supervisor I. Paoletti, co-supervisor Maya Zehliakova, at Department ABC, Politecnico di Milano, ACTLAB Unit.

\* INGRID PAOLETTI, PhD e architetto, è Professore Associato di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento ABC del Politecnico di Milano. E-mail: [ingrid.paoletti@polimi.it](mailto:ingrid.paoletti@polimi.it).