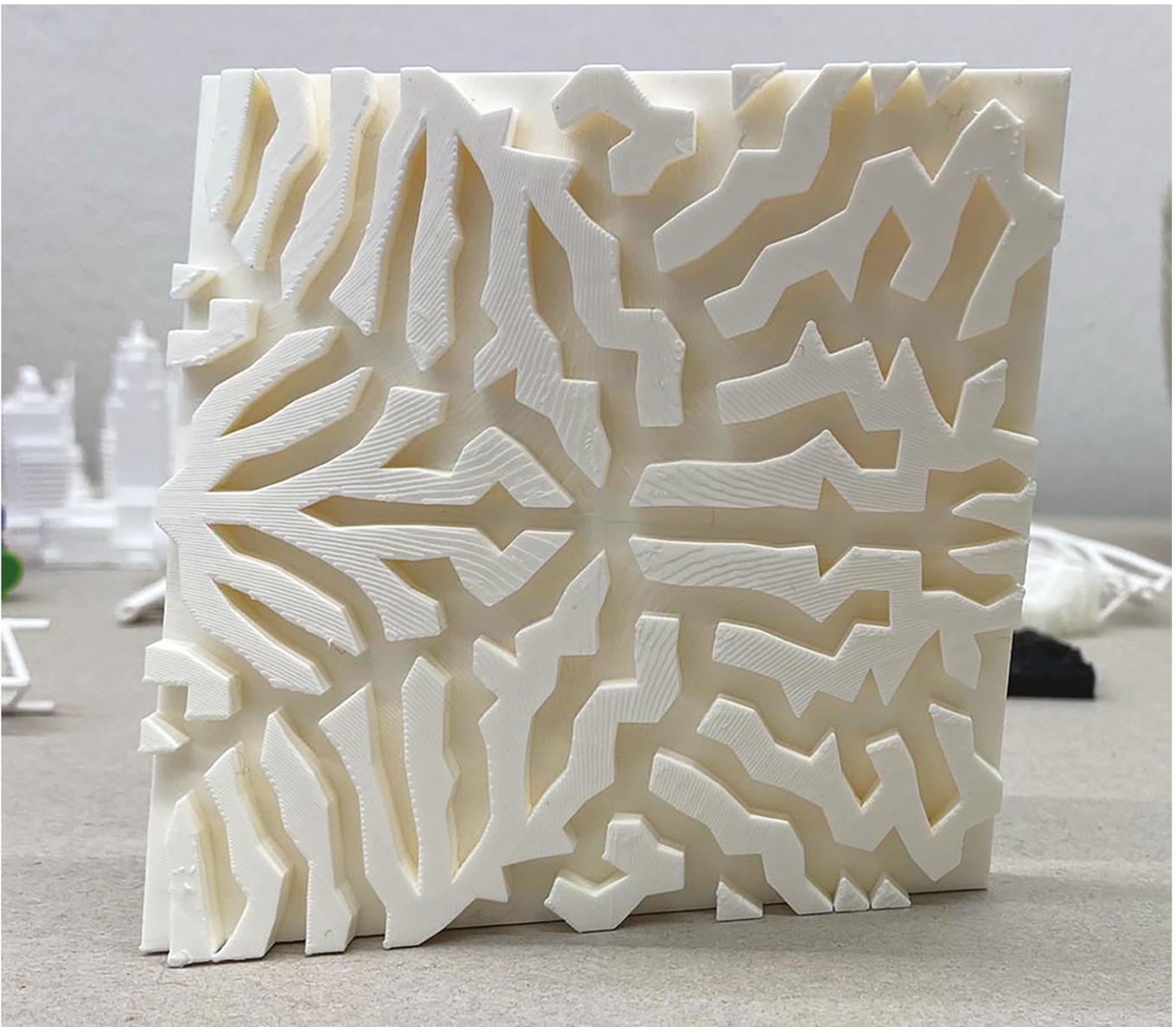


Barbara Pollini
PhD in Design, Dipartimento di Design,
Politecnico di Milano.
barbara.pollini@polimi.it

Tania Contardo
Ricercatrice in Botanica ambientale e applicata,
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale,
Architettonica e Matematica, Università di Brescia.
tania.contardo@unibs.it

Davide Paciotti
Ricercatore in Design, Scuola di Ateneo Architettura e
Design E. Vittoria, Università di Camerino.
davide.paciotti@unicam.it

Generative and Bioreceptive Design



01. Stampo texture in steriolitografia | Texture mold in steriolithography. Barbara Pollini, Laboratorio LaborA, Politecnico di Milano

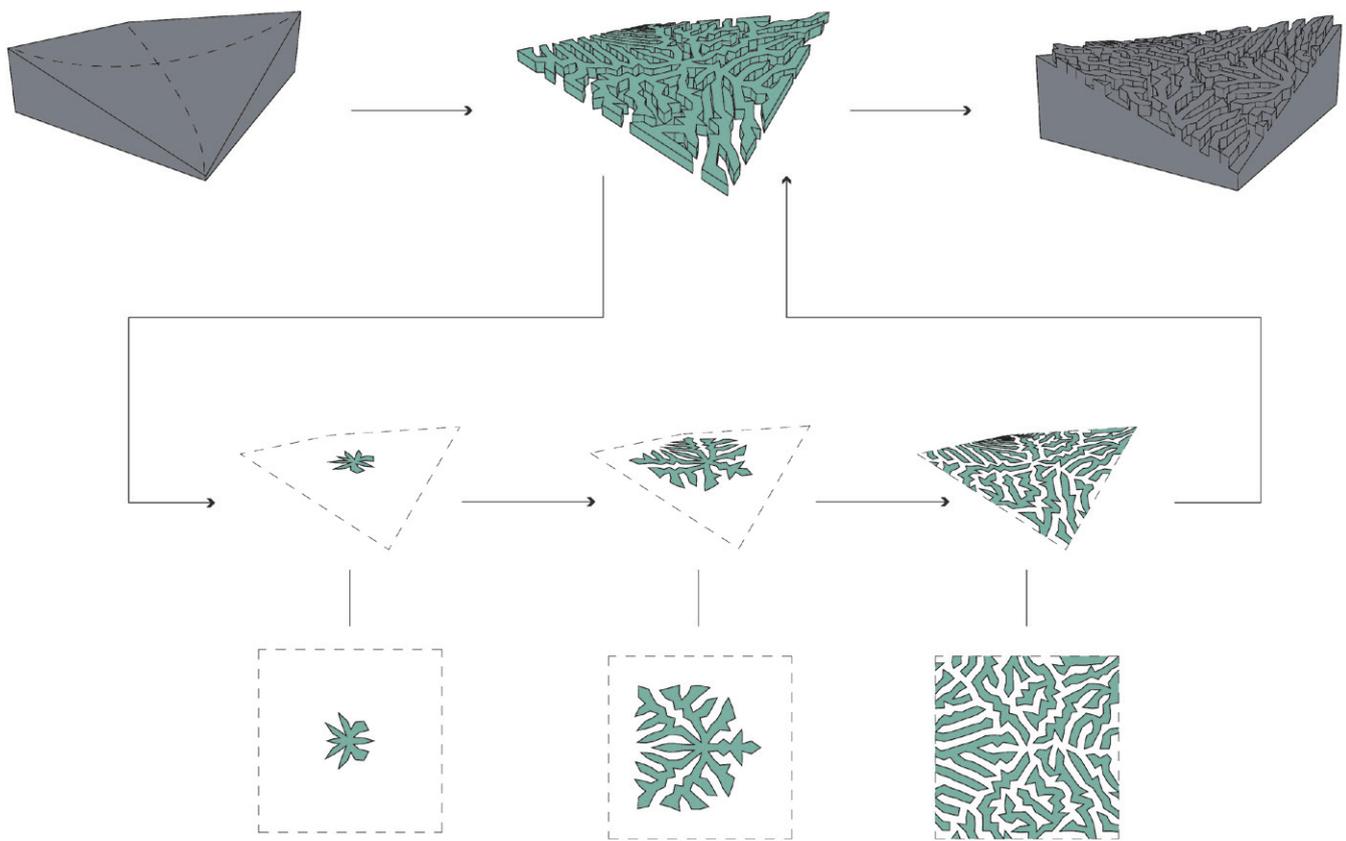
Progettare la bioricettività per il biomonitoraggio e la resilienza urbana

Generative and Bioreceptive Design *The urgency for sustainable solutions is driving many sectors, including design research, towards innovative transdisciplinary approaches. The last decade has been characterised by an increasing interaction between design and scientific disciplines, consolidated in the Biodesign approach. The contribution focuses on the study and prototype development of bioreceptive tiles through computational design to improve the propagation of lichens and mosses for their use as air quality biosensors.**

L'urgenza di soluzioni sostenibili sta spingendo molti settori, tra cui la ricerca sul design, verso approcci innovativi transdisciplinari. L'ultimo decennio è stato caratterizzato da una crescente interazione tra design e discipline scientifiche, consolidata nell'approccio del biodesign. Il contributo si concentra sullo studio e lo sviluppo prototipale di piastrelle biorecettive attraverso il computational design per migliorare la propagazione di licheni e muschi per il loro utilizzo come biosensori della qualità dell'aria.*

Introduzione

Il mondo del design sta diventando sempre più consapevole dei limiti dei modelli di produzione e consumo attuali, ed è quindi alla ricerca di soluzioni sostenibili. Per far fronte alla complessità di una transizione radicale la disciplina del design sta cercando di immaginare nuovi scenari produttivi guardando ai modelli biologici e alla contaminazione con altre discipline, che mirano a una materialità radicalmente sostenibile (Oxman, 2016). A tal fine, si sta consolidando il Biodesign, che combina design e biologia, coinvolgendo organismi viventi nel processo di progettazione (Myers, 2012, p. 288). Questo tipo di approccio potrebbe portare a una maggiore presenza di organismi viventi nell'ambiente costruito grazie all'uso di materiali biologici e allo sviluppo di artefatti bioprogettati. Questa caratteristica consente la creazione di sistemi di progettazione che si basano sulle capacità degli organismi di creare prodotti bio-augmented e ambienti multispecie. Il miglioramento del microclima, la cattura del carbonio, la riduzione del rumore e il fitorisanamento sono solo alcuni dei benefici che la vegetazione può apportare nelle aree urbane (Dadea *et al.*, 2017). Inoltre, le coperture crittogamiche (che comprendono cianobatteri, alghe, funghi, licheni e briofite), hanno un ruolo significativo nella fissazione dell'anidride carbonica e dell'azoto dall'atmosfera (Elbert *et al.*, 2012). Tali organismi, soprattutto licheni e muschi, possono essere utilizzati per il biomonitoraggio ambientale, definito come "l'uso di sistemi biologici (organismi e comunità di organismi) per monitorare i cambiamenti ambientali nello spazio e/o nel tempo" (UNI EN 16413:2014). I licheni e i muschi, grazie alle loro caratteristiche fisiologiche, sono attualmente utilizzati come bioindicatori dei cambiamenti della qualità dell'aria (Contardo *et al.*, 2020). Essendo sensibili all'inquinamento atmosferico, le alterazioni fisiologiche che si verificano negli ambienti inquinati si manifestano a livello individuale e di comunità; d'altra parte, molte specie sono in grado di bioaccumulare un gran numero di contaminanti, fornendo una stima affidabile della presenza e degli effetti biologici di tali sostanze (Bargagli e Mikhailova, 2002).

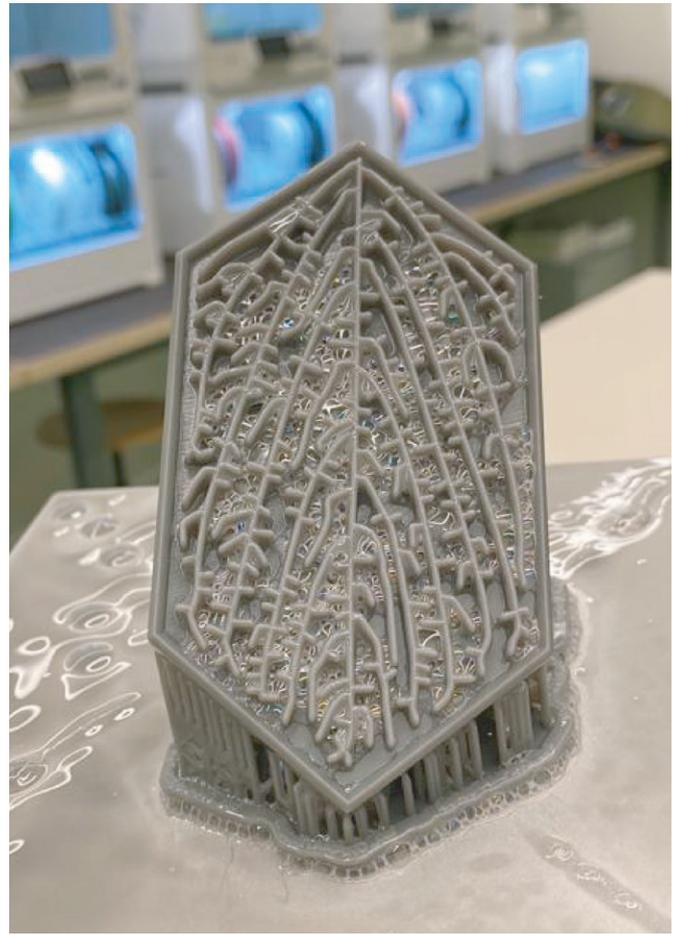


02. Modelli generativi | Generative models. Elaborazione degli autori

Obiettivi

Per favorire la biodiversità e la biofilia, i prodotti che compongono gli ambienti urbani dovrebbero essere progettati per sostenere la crescita e la rigenerazione spontanea degli organismi viventi, migliorando le relazioni tra più specie e prefigurando ambienti autoregolati e rigenerativi. Questa coesistenza con altri organismi dovrebbe essere favorita da una progettazione adeguata, che riguardi materiali, superfici, texture, spazi e habitat. In questo caso, il ruolo del prodotto come elemento di supporto per gli organismi è fondamentale e può essere progettato per soddisfare al meglio le loro esigenze di crescita. A questo proposito, il *Bioreceptive Design* (BD) è un approccio che si verifica ogni volta che un artefatto o un materiale è intenzionalmente progettato per essere colonizzato da uno o più gruppi di organismi viventi (Pollini e Rognoli, 2021), con l'obiettivo di sostenere assemblaggi biotici e abiotici autoregolanti, per favorire la biodiversità. Questo contributo descrive il pro-

getto *Bioreceptivity for biomonitoring*, parte dalla ricerca dottorale Pollini (2023), e ha come obiettivo la valorizzazione della presenza di licheni e muschi negli ambienti urbani attraverso il BD, testando le caratteristiche dei materiali e i trattamenti biologici adatti per una bio-colonizzazione efficace dell'ambiente costruito. L'approccio del *computational design* consente di gestire dati e modelli di sviluppo naturali per ottimizzare prodotti in grado di favorire un equilibrio simbiotico. La modellazione generativa è una risorsa importante nello sviluppo di prodotti biorecettivi, poiché permette di generare molte soluzioni e valutare le loro proprietà in modo efficiente, accelerando il processo di sviluppo del prodotto. La ricerca adotta un approccio transdisciplinare che mette in relazione la disciplina del design con quella della biologia, concentrandosi sul contesto del **biodesign**, dove la bioricettività è considerata una caratteristica positiva che offre un supporto significativo alle forme di vita incorporate nel processo di



03. Prototipo piastrella in stampa 3D a filamento per la realizzazione dello stampo | Prototype tile in filament 3D printing for making the mold. Barbara Pollini, Laboratorio LaborA, Politecnico di Milano

progettazione. Inoltre, l'utilizzo di prodotti biorecettivi per attività di biomonitoraggio è un obiettivo importante della ricerca, al fine di sensibilizzare e di favorire la consapevolezza della qualità ambientale. Ciò potrebbe aprire la strada all'utilizzo di soluzioni biorecettive in ambienti chiusi per il biomonitoraggio della qualità dell'aria e per il suo successivo biorisanamento.

Approccio e metodo

La ricerca, finalizzata allo sviluppo e alla prototipazione di piastrelle destinate a favorire la colonizzazione biologica, segue la metodologia progettuale del *Bioreceptive Design*. Questo approccio prevede la progettazione e lo sviluppo di soluzioni che considerano attentamente la composizione del materiale, le proprietà fisiche della superficie e la forma dell'artefatto (Pollini e Rognoli, 2021). La ricerca percorre cinque fasi di sviluppo: (i) *Bioreceptive Design*, che prevede la selezione delle caratteristiche del materiale per favorire un'adeguata ospitalità per l'orga-

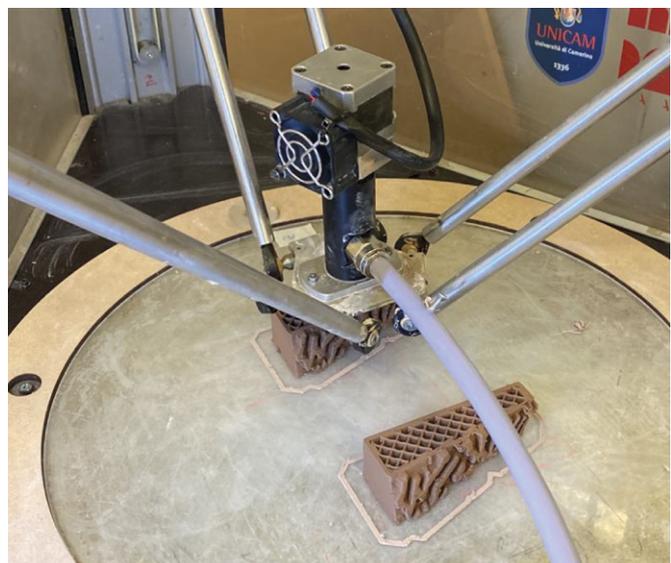
nismo scelto; (ii) *biomimicry*, che trae ispirazione dalle forme e texture naturali per migliorare la distribuzione spaziale dell'acqua sulla superficie e aumentare la capacità di autoregolazione; (iii) *computational design*, che utilizza algoritmi generativi per elaborare forme collegate alla distribuzione dell'acqua; (iv) *additive manufacturing*, che consente la realizzazione dei prototipi di studio; (v) esposizione e successivo processo di analisi della colonizzazione dei prototipi.

Per seguire il processo procedurale del *Bioreceptive Design*, si deve prima di tutto conoscere il ciclo di vita e le condizioni di vita degli organismi selezionati, in modo da creare manufatti che rispondano alle loro esigenze. Durante la fase preliminare, sono state quindi elaborate due carte d'identità relative a due specie di organismi cosmopoliti: il lichene *Xanthoria parietina* e il muschio *Bryum argenteum*, entrambi comuni anche in ambienti fortemente urbanizzati. L'analisi delle caratteristiche degli organismi e delle condizioni di crescita preferite ha permesso di identificare le principali proprietà materiche

che dovevano essere considerate nello sviluppo del progetto. Per comprendere e validare le proprietà biorecettive, sono state sviluppate due principali tipologie di piastrelle con diverse variabili. Queste si differenziano per la distribuzione della texture, sia introversa che estroversa, su cui studiare la bioricettività. La piastrella è stata considerata come l'unità di misura minima per studiare l'influenza della forma che definisce il supporto, della texture che caratterizza la superficie superiore e del materiale di cui è composta. La distribuzione dell'acqua in superficie è un elemento cruciale per la crescita e lo sviluppo. Sia i licheni che i muschi richiedono un'umidità elevata, ma non tollerano ristagni d'acqua. Ciò implica che il substrato ideale deve favorire il drenaggio dell'acqua e, se possibile, assorbire l'umidità atmosferica senza presentare zone in cui l'acqua possa ristagnare per lungo tempo. La prima tipologia di piastrella è stata configurata come un supporto di base quadrata 50x50 mm ed esagonale 100x50 mm con una texture impressa sulla superficie superiore. Lo sviluppo della texture è stato realizzato attraverso processi di modellazione generativa definendo diverse varianti di pattern attraverso algoritmi bioispirati. Le varianti sono state generate attraverso la simulazione di reticoli dendritici, un archetipo dei modelli di crescita in natura (Miguel, 2014) e spesso associato al percorso che un liquido impiega mentre defluisce sopra una superficie. Il secondo tipo di piastrella si caratterizza attraverso una base quadrata 100x100x40 mm con una superficie superiore convessa con un andamento che decade alla base in prossimità di due spigoli opposti. Al di sopra della superficie si trova un pattern dendritico in rilievo. Assemblando l'una accanto all'altra più piastrelle, si ottiene una superficie ondulata, con un movimento concavo e convesso dove le scanalature definite dal pattern favoriscono la distribuzione dell'acqua su tutta la superficie in modo omogeneo (img. 06). Tra i materiali analizzati sono stati selezionati la terracotta, l'argilla bianca e rossa, la malta e il calcestruzzo. La sperimentazione di materiali diversi ci permette anche di verificare l'effetto dei diversi colori e della porosità del materiale. Il colore è una caratteristica mol-



04. Piastrelle in terracotta e argilla | Clay tiles. Barbara Pollini



05. Produzione della piastrella in stampa 3D di materiali fluido-densi | Tile production in 3D printing of fluid-dense materials. Davide Paciotti, Laboratorio saadlab Prototype, Scuola di Ateneo Architettura e Design, Università di Camerino



06. Superficie composta da venticinque piastrelle in cemento | Surface composed of twenty-five concrete tiles. Barbara Pollini

to spesso trascurata nello studio della formazione di biofilm, tuttavia sembra influenzare la crescita dei cianobatteri, preferendo il rosso e il bianco (Sanmartín *et al.*, 2020). La porosità e la rugosità sono invece parametri molto noti e importanti per questo campo di studio (D’Orazio *et al.*, 2014), così come i livelli di pH (Manso *et al.*, 2014). Per la fase di prototipazione, si è deciso di utilizzare tre processi di *additive manufacturing* per realizzare tre set di piastrelle con caratteristiche differenti. Per la prima tipologia di piastrella, è stata presa in considerazione la tecnologia di stampa 3D della stereolitografia. Grazie all’utilizzo di un fotopolimero e all’elevata precisione della tecnologia, è stato possibile realizzare gli stampi in positivo delle texture da imprimere sulle piastrelle in terracotta e argilla (img.04), realizzati all’interno del Laboratorio LaborA del Politecnico di Milano. Per la realizzazione del secondo tipo di piastrella, sono stati scelti due processi distinti per sfruttare al meglio i materiali scelti e aumentare le varianti. Il primo processo ha utilizzato la stampa 3D per la deposizione di filamento, con lo scopo di realizzare uno stampo per la successiva colata della malta e del calcestruzzo (img. 03). Il secondo processo preso in esame è stato quello della tecnologia di stampa 3D di materiali fluidi densi, che ha permesso di realizzare direttamente la piastrella con l’argilla (img. 05), realizzati all’interno del Laboratorio SaadLab Prototype della Scuola di Architettura e Design dell’Università di Camerino. I prototipi delle piastrelle, una volta realizzati, sono stati esposti all’aria aperta in un ambiente molto colonizzato da muschi e licheni con tre diversi trattamenti. Il primo ha previsto l’esposizione senza trattamento per verificare l’effettiva ospitalità del manufatto con le relative texture. Il secondo trattamento è stato effettuato attraverso il trapianto di organismi interi e adulti (img. 07). Per il terzo trattamento sono state trapiantate solo le parti riproduttive dei licheni e dei muschi. Da un punto di vista biologico, lo studio confronta le condizioni favorevoli

in diversi scenari, ossia l’assenza di nutrienti, la presenza di individui adulti e la presenza di individui giovani.

Risultati e discussione

Attualmente le osservazioni sono in corso, considerando i tempi necessari per il processo di colonizzazione e crescita di questi organismi. Nonostante al momento non si siano manifestati risultati visibili, sono emersi alcuni risultati preliminari. Dalle prime piastrelle in cemento e malta esposte nel 2022 è stato possibile notare una prima colonizzazione da parte di alghe verdi e muschi protonemata, primi stadi di sviluppo dei muschi, considerati un buon segno in quanto specie pioniere (img. 08). I risultati iniziali rappresentano un passo importante

L’approccio del computational design consente di gestire dati e modelli di sviluppo naturali per ottimizzare prodotti in grado di favorire un equilibrio simbiotico

nella verifica dei dati e dei modelli di sviluppo naturali impiegati nel processo di generazione formale delle piastrelle. Questi risultati saranno fondamentali per la fase successiva del progetto di ricerca, che mira a creare prodotti in grado di promuovere un equilibrio simbiotico. Tale colonizzazione, inoltre, ci ha permesso di confermare alcune ipotesi presenti in letteratura, come l’influenza dei substrati porosi e la facilità di adesione della copertura crittogamica offerta dai microsolchi derivati dalla caratteristica di accrescimento *layer-by-layer* della stampa 3D (Huang *et al.*, 2018; Mustafa *et al.*, 2021). Inoltre, abbiamo potuto constatare che i trapianti danno interessanti risultati. Il muschio trapiantato nel gennaio 2022 su una piastrella di cemento esposto all’esterno è in totale attività vi-



07. Trapianto di organismi adulti su una piastrella di cemento | Transplantation of adult organisms to a concrete tile. Barbara Pollini e Tania Contardo

tale. Inoltre, il trapianto di lichene avvenuto nel gennaio 2022 sta avendo successo, mantenendo la sua vitalità anche dopo un anno di esposizione in ambiente interno. Ciò apre la strada alla possibilità di utilizzare queste soluzioni biorecettive in ambienti chiusi, con applicazioni per la progettazione biofilica, il biomonitoraggio e il biorisanamento dell'aria interna.

Conclusioni

Grazie a questa collaborazione multidisciplinare, i possibili risultati del progetto possono essere ampi, contribuendo alla resilienza urbana biofila e influenzando positivamente il design, l'architettura, la lichenologia, la biologia e la *citizen science*. La selezione di questi organismi si è basata sulla loro capacità di sopravvivere anche in ambienti altamente urbanizzati. La copertura crittogamica, in generale, potrà influenzare positivamente sulla qualità dell'aria, aumentando gli spazi verdi e accelerando l'esposizione delle città al *rewilding* e alla biofilia. Il progetto prevede cicli di ricerca reiterati, attualmente ancora in corso, orientati a studiare quali siano i mate-

riali e le texture più favorevoli su cui far proliferare le specie selezionate, nonché a definire la quantità minima di superficie necessaria per influenzare positivamente il monitoraggio della qualità dell'area. I prossimi passi seguiranno il percorso di ricerca già delineato. In particolare, il design delle piastrelle sarà ottimizzato in base ai primi risultati di analisi, per selezionare le caratteristiche che stanno favorendo la crescita delle specie prese in esame. Una volta definite le caratteristiche e i modelli migliori del materiale, si potrebbero aggiornare le linee guida per la progettazione di materiali biorecettivi per queste specie. Verranno testati diversi trattamenti prima dell'esposizione e ci si concentrerà sull'utilizzo di un mezzo naturale per favorire il trapianto. Con questo studio, vogliamo quindi evidenziare come il *computational design* giochi un ruolo chiave nella progettazione di forme bioispirate, rappresentando opportunità di espressione e innovazione, mentre i processi di *additive manufacturing* supportano la creazione di tali strutture bioispirate complesse. Inoltre, la ricerca vuole sottolineare come il BD possa fornire esperienze materiali

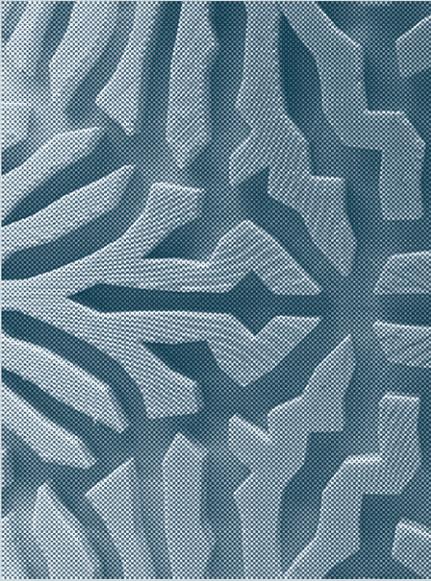


08. Piastrella in cemento colonizzata da parte di alghe verdi e muschi protonemata | Cement tile colonized by green algae and moss protonemata. Barbara Pollini e Tania Contardo

(Karana *et al.*, 2015) che diventano significative, per comprendere e monitorare la salute ambientale, sfruttando la rigenerazione naturale e l'adattabilità degli ecosistemi. Questa prospettiva ci invita a considerare l'importanza di preservare e valorizzare le aree di transizione, consentendo alla natura di svolgere il suo ruolo rigenerativo (Clément e De Pieri, 2005). Considerando la prospettiva umana, l'esperienza materiale prende vita attraverso la relazione tra il materiale stesso e l'organismo che lo colonizza. In questo contesto, emerge una notevole differenza rispetto ai materiali tradizionali, poiché si manifesta un cambiamento nel tempo e una percezione del materiale come entità vitale. L'organismo vivente non può riportare considerazioni sugli aspetti sensoriali, emotivi, significativi e performativi, ma questi livelli potrebbero essere valutati in base alla qualità della sua crescita. La proposta è quella di inserire nel quadro dell'esperienza materiale un livello temporale trasversale, che possa riportare informazioni su come sensorialità, emozione, performance e significato cambiano nel tempo.*

BIBLIOGRAFIA

- Bargagli, R., Mikhailova, I. (2002). Accumulation of Inorganic Contaminants. In Nimis, P.L., Scheidegger, C., Wolseley, P.A. (a cura di), *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. Dordrecht: Springer, pp. 65-84.
- Clément, G., De Pieri, F. (2005). *Manifesto del Terzo paesaggio*. Macerata: Quodlibet.
- Comitato europeo di normazione, (2014). *Ambient air – Biomonitoring with lichens – Assessing epiphytic lichen diversity UNI EN 16413:2014*.
- Contardo, T., Vannini, A., Sharma, K., Giordani, P., Loppi, S. (2020). Disentangling sources of trace element air pollution in complex urban areas by lichen biomonitoring. A case study in Milan (Italy). In Ebinghaus, R. (a cura di), *Chemosphere*. Amsterdam: Elsevier.
- Dadea, C., Russo, A., Tagliavini, M., Mimmo, T., Zerbe, S. (2017). Tree species as tools for biomonitoring and phytoremediation in urban environments: a review with special regard to heavy metals. *Arboriculture & Urban Forestry*, n. 43, Issue 4. International Society of Arboriculture, pp. 155-167.
- D'Orazio, M., Cursio, G., Graziani, L., Aquilanti, L., Osimani, A., Clementi, F., Yéprémian, C., Lariccia, V., Amoroso, S. (2014). Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks. *Building and Environment*, n. 77, pp. 20-28.
- Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., Steinkamp, J., Büdel, B., Andreae, M.O., Pöschl, U. (2012). Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, n. 5, pp. 459-462.
- Huang, Y., Zheng, Y., Li, J., Liao, Q., Fu, Q., Xia, A., Fu, J., Sun, Y. (2018). Enhancing microalgae biofilm formation and growth by fabricating microgrooves onto the substrate surface. *Bioresource Technology*, n. 261, pp. 36-43.
- Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., Zeeuw van der Laan, A. (2015). Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. In *International Journal of Design*, National Taiwan University of Science and Technology, vol. 9, no. 2, pp. 35-54.
- Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A. (2014). Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity. In *Construction and Building Materials*, Elsevier BV, vol. 54, pp. 485-495.
- Miquel, A.F. (2014). Dendritic design as an archetype for growth patterns in nature: fractal and constructal views. *Frontiers in Physics*, Frontiers Media, vol. 2.
- Mustafa, K.F., Prieto, A., Ottele, M. (2021). The Role of Geometry on a Self-Sustaining Bio-Receptive Concrete Panel for Facade Application. *Sustainability*, MDPI, vol. 13.
- Oxman, N. (2016). *Age of Entanglement*. Journal of Design and Science. Cambridge: The MIT Press.
- Pollini, B. (2023) *Healing Materialities from a Biodesign perspective. Framing biodesigned materials and artefacts for the sustainability transition*. Ph.D. thesis, Politecnico di Milano.
- Pollini, B., Rognoli, V. (2021). Enhancing living/non-living relationships through designed materials. *Responsible biotechnologies and biodesign for the built environment*. Coimbra: International Conference Construction, Energy, Environment & Sustainability CEES 2021.
- Sanmartín, P., Grove, R., Carballeira, R., Viles, H. (2020). Impact of colour on the bioreceptivity of granite to the green alga *Apatococcus lobatus*: Laboratory and field testing. *Science of the Total Environment*, Elsevier BV, vol. 745, p. 141-179.



Barbara Pollini, Tania Contardo, Davide Paciotti

Generative and Bioreceptive Design

Designing bioremediation for biomonitoring and urban resilience

Introduction

The design world is becoming increasingly aware of the limits of current production and consumption models and is therefore looking for sustainable solutions. To cope with the complexity of a radical transition, the design discipline is trying to imagine new production scenarios by looking at biological models and contamination with other disciplines, aiming for a radically sustainable materiality (Oxman, 2016). To this end, Biodesign, which combines design and biology by involving living organisms in the design process, is gaining ground (Myers, 2012, p. 288). This type of approach could lead to a greater presence of living organisms in the built environment using biological materials and the development of bio-designed artefacts. This allows the creation of design systems that rely on the organisms' abilities to create bio-augmented products and multi-species environments. Improved microclimate, carbon capture, noise reduction and phytoremediation are just some of the benefits that vegetation can provide in urban areas (Dadea et al., 2017). In addition, cryptogamic covers (which include cyanobacteria, algae, fungi, lichens and bryophytes), play a significant role in the fixation of carbon dioxide and nitrogen from the atmosphere (Elbert et al., 2012). Such organisms, especially lichens and mosses, can be used for environmental biomonitoring, defined as 'the use of biological systems (organisms and communities of organisms) to monitor environmental changes in space and/or time' (UNI EN 16413:2014). Lichens and mosses, due to their physiological characteristics, are currently used as bioindicators of air quality changes (Contardo et al., 2020). Being sensitive to air pollution, physiological changes occurring in polluted environments are manifested at the individual and community level; on the other hand, many species can bioaccumulate large numbers of contaminants, providing a reliable esti-

mate of the presence and biological effects of these substances (Bargagli and Mikhailova, 2002).

Objectives

To foster biodiversity and biophilia, the products that make up urban environments should be designed to support the spontaneous growth and regeneration of living organisms, enhancing the relationships between multiple species and prefiguring self-regulating and regenerative environments. This coexistence with other organisms should be fostered by appropriate design, covering materials, surfaces, textures, spaces and habitats. In this case, the role of the product as a supporting element for organisms is fundamental and can be designed to best meet their growth needs. In this regard, *Bioreceptive Design (BD)* is an approach that occurs whenever an artefact or material is intentionally designed to be colonised by one or more groups of living organisms (Pollini and Rognoli, 2021), with the aim of sustaining self-regulating biotic and abiotic assemblages to foster biodiversity. This contribution describes the *Bioreceptivity for biomonitoring* project, which started from Pollini's doctoral research (2023), and aims to enhance the presence of lichens and mosses in urban environments through BD, testing material characteristics and biological treatments suitable for an effective bio-colonisation of the built environment. The computational design approach enables natural data and development models to optimise products for symbiotic balance. Generative modelling is an important resource in the development of bioreceptive products, as it allows many solutions to be generated and their properties to be evaluated efficiently, accelerating the product development process. The research adopts a transdisciplinary approach that relates the discipline of design with that of biology, focusing on the context of

biodesign, where bioreceptivity is considered a positive feature that offers significant support for the life forms incorporated in the design process. Furthermore, the use of bioreceptive products for biomonitoring activities is an important research objective to raise awareness of environmental quality. This could pave the way for the use of bioreceptive solutions in indoor environments for biomonitoring of air quality and its subsequent bioremediation.

Approach and method

The research, aimed at the development and prototyping of tiles intended to promote biological colonisation, follows the *Bioreceptive Design* methodology. This approach involves the design and development of solutions that carefully consider the composition of the material, the physical properties of the surface and the shape of the artefact (Pollini and Rognoli, 2021). The research goes through five stages of development: (i) *Bioreceptive Design*, which involves the selection of material characteristics to foster an appropriate host for the chosen organism; (ii) biomimicry, which draws inspiration from natural shapes and textures to improve the spatial distribution of water on the surface and increase the ability to self-regulate; (iii) computational design, which uses generative algorithms to devise shapes related to water distribution; (iv) additive manufacturing, which allows for the creation of study prototypes; (v) display and subsequent process of analysing the colonisation of the prototypes. To follow the procedural process of *Bioreceptive Design*, one must first know the life cycle and living conditions of the selected organisms to create artefacts that meet their needs. During the preliminary phase, two identity maps were therefore drawn up for two species of cosmopolitan organisms: the lichen *Xanthoria parietina* and the moss *Bryum argenteum*, both of which are also common in highly

urbanised environments. The analysis of the organisms' characteristics and preferred growth conditions enabled the identification of the main material properties that had to be considered in the development of the project. To understand and validate the bioreceptive properties, two main tile types were developed with different variables. These differ in texture distribution, both introverted and extroverted, on which to study bioreceptivity. The tile was considered as the minimum unit to study the influence of the shape that defines the substrate, the texture that characterises the upper surface and the material of which it is composed. The distribution of water on the surface is a crucial element for growth and development. Both lichens and mosses require high humidity, but do not tolerate water stagnation. This implies that the ideal substrate must promote water drainage and, if possible, absorb atmospheric moisture without having areas where water can stagnate for a long time. The first type of tile was configured as a 50x50 mm square and 100x50 mm hexagonal base with a texture imprinted on the top surface. The development of the texture was realised through generative modelling processes by defining different pattern variants through bio-inspired algorithms. The variants were generated through the simulation of dendritic lattices, an archetype of growth patterns in nature (Miguel, 2014) and often associated with the path a liquid takes as it flows over a surface. The second type of tile is characterised by a 100x100x40 mm square base with a convex upper surface with a pattern that decays at the base near two opposite edges. Above the surface is a raised dendritic pattern. By assembling several tiles next to each other, an undulating surface is obtained, with a concave and convex movement where the grooves defined by the pattern favour the distribution of water evenly over the entire surface (img. 06). Among the materials analysed, terracotta, white and red clay, mortar and concrete were selected. Experimenting with different materials also allows us to test the effect of different colours and porosity of the material. Colour is a characteristic that is often overlooked in the study of biofilm formation, yet it seems to influence the growth of cyanobacteria, preferring red and white (Sanmartín et al., 2020). Porosity and roughness, on the other hand, are well-known and important parameters for this field of study (D'Orazio et al., 2014), as are pH levels (Manso et al., 2014). For the prototyping phase, it was decided to use three *additive manufacturing* processes to produce three sets of tiles with different characteristics. For the first type of tile, the 3D printing technology of stereolithography was considered. Thanks to the use of a photopolymer and the high precision of the technology, it was possible to create the positive moulds of the textures to be imprinted on the terracotta and clay tiles (img. 04), which were produced in

the LaborA Laboratory of the Politecnico di Milano. For the realisation of the second type of tile, two separate processes were chosen to make the best use of the chosen materials and increase the variations. The first process used 3D printing for the deposition of filament, with the aim of making a mould for the subsequent casting of mortar and concrete (img. 03). The second process examined was that of 3D printing technology for dense fluid materials, which allowed the tile to be made directly from clay (img. 05), realised within the SaadLab Prototype Laboratory of the School of Architecture and Design of the University of Camerino. The tile prototypes, once made, were exposed in the open air in an environment heavily colonised by mosses and lichens with three different treatments. The first involved exposure without treatment to test the actual hospitable nature of the artefact and its textures. The second treatment was carried out by transplanting whole and adult organisms (img. 07). For the third treatment, only the reproductive parts of lichens and mosses were transplanted. From a biological point of view, the study compares favourable conditions under different scenarios, i.e. the absence of nutrients, the presence of adult individuals and the presence of young individuals.

Results and discussion

Observations are currently ongoing, considering the time required for the colonisation and growth process of these organisms. Although there are no visible results now, some preliminary results have emerged. From the first cement and mortar tiles exposed in 2022, it was possible to see initial colonisation by green algae and protonemata mosses, early stages of moss development, considered a good sign as pioneer species (img. 08). The initial results represent an important step in verifying the data and natural development models used in the formal tile generation process. These results will be fundamental for the next phase of the research project, which aims to create products capable of promoting a symbiotic balance. Moreover, this colonisation allowed us to confirm some hypotheses in the literature, such as the influence of porous substrates and the ease of adhesion of cryptogamic cover offered by microgrown tiles derived from the *layer-by-layer* growth feature of 3D printing (Huang et al., 2018; Mustafa et al., 2021). Furthermore, we have been able to see that the transplants give interesting results. The moss transplanted in January 2022 on a concrete tile exposed outdoors is in total viability. In addition, the lichen transplanted in January 2022 is succeeding, maintaining its vitality even after one year of indoor exposure. This paves the way for the possibility of using these bioreceptive solutions indoors, with applications for biophilic design, biomonitoring and indoor air bioremediation.

Conclusions

Thanks to this multidisciplinary collaboration, the possible outcomes of the project can be extensive, contributing to biophilic urban resilience and positively influencing design, architecture, lichenology, biology and citizen science. The selection of these organisms was based on their ability to survive even in highly urbanised environments. Cryptogamic cover, in general, can positively influence air quality, increasing green spaces and accelerating the exposure of cities to rewilding and biophilicity. The project involves repeated cycles of research, currently still in progress, aimed at investigating which are the most favourable materials and textures on which the selected species can proliferate, as well as defining the minimum amount of surface area required to positively influence the quality monitoring of the area. The next steps will follow the research path already outlined. In particular, the design of the tiles will be optimised based on the first results of the analysis, to select the characteristics that are favouring the growth of the species under consideration. Once the best material characteristics and patterns are defined, guidelines for the design of bioreceptive materials for these species could be updated. Different pre-exposure treatments will be tested and the focus will be on the use of a natural medium to promote transplantation. With this study, we want to highlight how computational design plays a key role in the design of bioinspired shapes, representing opportunities for expression and innovation, while *additive manufacturing* processes support the creation of such complex bioinspired structures. Furthermore, the research aims to emphasise how BD can provide material experiences (Karana et al., 2015) that become meaningful, in order to understand and monitor environmental health, exploiting the natural regeneration and adaptability of ecosystems. This perspective invites us to consider the importance of preserving and enhancing transition areas, allowing nature to play its regenerative role (Clément and De Pieri, 2005). Considering the human perspective, the material experience comes to life through the relationship between the material itself and the organism that colonises it. In this context, a significant difference from traditional materials emerges, as there is a change in time and a perception of the material as a living entity. The living organism cannot report on sensory, emotional, meaningful and performative aspects, but these levels could be evaluated according to the quality of its growth. The proposal is to include a transversal temporal level within the framework of material experience, which could report on how sensoriality, emotion, performance and meaning change over time.*