

Antonella Violano,

Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale, Università della Campania L. Vanvitelli, Italia

antonella.violano@unicampania.it

**Abstract.** Il dibattito internazionale su materia e progetto assume come rigenerativo e resiliente un edificio che interagisce simbioticamente con il suo intorno: si adatta, coevolve, usa l'energia del sole e le risorse del suolo, produce ossigeno e sequestra CO<sub>2</sub>, chiude il ciclo dell'acqua e dei rifiuti ... grazie all'epigenesi dei suoi materiali. Partendo dall'*Ecovative*, un biomateriale prodotto negli USA, la ricerca condotta presso il DADI dell'Università della Campania "L. Vanvitelli", in partenariato con soggetti industriali, sperimenta la produzione di isolanti termici biologici coltivati con miceli. La sperimentazione ha registrato una risposta fortemente adattiva del materiale, risultato rigenerativo, ecocompatibile, rinnovabile, con impatto ambientale zero e minimo Embodied Energy.

**Parole chiave:** Materiali a base biologica; Materiali coltivati; Approccio "cradle-to-cradle"; Impronta di carbonio.

## Introduzione

Obiettivi prestazionali sempre più ambiziosi, livelli esigenti sempre più elevati, requisiti normativi sempre più esigenti definiscono le dimensioni secondo cui misurare tutte le trasformazioni tangibili e intangibili dell'architettura del ventunesimo secolo. La ricerca di materiali, sistemi e componenti multiformi e performanti stanno inesorabilmente sostituendo il concetto lecorbuseriano di architettura come "macchina per abitare" con quella di architettura come "organismo" in costante coevoluzione con il suo intorno ambientale.

Al pari di altre discipline scientifiche, anche l'architettura si è trasformata in un settore in cui intensa è la ricerca, la sperimentazione e soprattutto la contaminazione con altre forme di sapere: biologia, fisica, genetica. L'approccio metaforico-biologico di Philip Steadman, fondato sulla ricerca della coerenza di ogni singola parte con il tutto, può essere interpretato come criterio e metodo con cui superare il concetto di integrazione formale e funzionale tra l'oggetto architettonico e il suo intorno ambientale (ripreso nei principi alla base dell'architettura bioclimatica),

Beyond Materials: the experimentation of bio-based grown materials from mycelia

**Abstract.** The international debate on materials and design assumes as regenerative and resilient a building that interacts symbiotically with its surroundings: it fits, coevolves, uses solar energy and soil resources, produces oxygen and captures CO<sub>2</sub>, closes the cycle of water and waste ... thanks to the epigenesis of its materials. Starting from *Ecovative*, a biomaterial produced in the U.S.A., the research carried out at the DADI of University of Campania "L. Vanvitelli", in partnership with industry participants, experiences the production of bio-based thermal insulation materials grown with mycelia. The experimentation has recorded a highly adaptive response from the material, which resulted regenerative, eco-friendly, renewable, with a zero environmental impact and a minimum Embodied Energy.

**Keywords:** Bio-based materials; Grown materials; "cradle-to-cradle" approach; Carbon footprint.

per arrivare a una forma di interazione materica e biodinamica. La frontiera dell'analisi visiva e formale della metafora biologica viene così superata per arrivare a pensare e ponderare l'architettura anche dal punto di vista metabolico e biologico. In questo modo, si configura una rinnovata relazione tra edificio e intorno ambientale, che si riflette nel rapporto non più simbiotico ma coevolutivo della materia, fondato sull'approccio "Cradle-to-Cradle" (McDonough e Braungart, 2010). L'organismo edilizio non è solo pensato progettualmente con un suo DNA costruttivo, una sua forma, un suo orientamento, una sua permeabilità ai flussi di materia e di energia, che dettano i limiti e i punti di forza delle sue prestazioni ambientali; esso stesso vive e si integra in modo smart con l'ecosistema urbano di cui entra a far parte, fornendo veri e propri *servizi ecologici*. Ed immediatamente il pensiero va all'"Arcologia" di Soleriana memoria, che accomuna il nobile intento di ridurre al minimo l'impatto ambientale degli edifici, nel loro intero ciclo di vita, con il tentativo non più utopico di assegnare loro un Valore ecologico Intrinseco, che nella definizione di Valore Totale (Pearce e Turner, 1989) risiede in quella particella "e" che rappresenta la capacità di un ecosistema di essere habitat per i suoi abitanti.

In sinergia con l'evoluzione del dibattito internazionale su materia e progetto, se le scelte tecnologiche seguono l'approccio "Cradle to Cradle", il rapporto sinergico tra edificio e intorno ambientale aumenta, non soltanto per l'equilibrato scambio di materia ed energia in ingresso e in uscita dall'organismo edilizio attraverso il suo involucro, ma anche grazie alla genesi e all'epigenesi dei suoi materiali. Il materiale a base biologica assume, infatti, il comportamento di un vero e proprio essere vivente che interagisce, si adatta, si evolve, si protegge e trae il massimo be-

## Introduction

More and more ambitious performing goals, higher and higher levels needed, more and more stringent standards define the dimensions according to which measuring all tangible and intangible transformations of the 21st century architecture. The search for multiform and performing materials, systems and components are inexorably replacing the LeCorbuserian concept of architecture as a "machine for living" with that one of architecture as an "organism" in constant co-evolution with its environmental surroundings. As well as other scientific disciplines, architecture has also been changed into a sector where research, experimentation and above all contamination with other forms of knowledge are intense: biology, physics and genetics. Philip Steadman's metaphorical-biological approach, based on the search for the

coherence of each single part with the whole, can be interpreted as a criterion and a method used to overcome the concept of formal and functional integration between the architectural object and its environmental surroundings (resumed in the principles that are at the core of bioclimatic architecture), to reach a form of materials and biodynamic interaction. The border of the visual and formal analysis of the biological metaphor is thus overcome in order to think and ponder architecture also from the metabolic and biological point of view. So there is a renewed relationship between the building and its environmental surroundings, which is reflected in the non-symbiotic but coevolutionary relationship of the materials, based on the "Cradle-to-Cradle" approach (McDonough and Braungart, 2010). Building as an organism is not only thought with its construc-

neficio dal variare delle condizioni al contorno. Così concepito, l'edificio fornisce il necessario supporto fisico e tecnico al sistema urbano di cui è parte, lavora come un generatore di servizi ecosistemici e, secondo il modello rigenerativo, utilizza l'energia del sole e usa le risorse del suolo, produce ossigeno e sequestra CO<sub>2</sub>, chiude il ciclo dell'acqua e dei rifiuti, respira, si adatta alle diverse stagioni, è costruito con materiali naturali (riciclati e/o scarti di lavorazione) che saranno a loro volta riciclabili e/o totalmente reintegrabili nel ciclo vitale naturale alla fine della loro vita economica utile. Il controllo del bilancio ambientale interessa, infatti, direttamente i materiali da costruzione come elementi di input del processo costruttivo, oggi fortemente orientato a ridurre non solo l'impatto ambientale in termini di Impronta di Carbonio, ma anche l'energia incorporata<sup>1</sup> dei materiali utilizzati per costruire l'edificio (Crawford, 2011).

In questo panorama scientificamente in evoluzione si colloca il progetto di ricerca sperimentale per la produzione di isolanti termici coltivati a base biologica, condotto in partenariato tra università (DADI - Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell'Università della Campania "L. Vanvitelli") e soggetti industriali (Partner SAIPAN srl, Nafco Italia srl, Service Biotech s.r.l.), finanziatori e fornitori di servizi e materie prime per la fase sperimentale.

La ricerca prende spunto concettuale dallo studio di un biomateriale prodotto a Green Island (NY-USA), l'Ecovative, realizzato con miceli e paglia di canapa o pioppo tremolo. Questo materiale è completamente biodegradabile e compostabile; la massa di ife filamentose (la parte vegetativa del tallo del fungo) si intreccia alle paglie e forma in una-due settimane una struttura variamente compatta e minimamente rigida, con ottime proprietà isolanti.

tive DNA, its shape, its orientation, its permeability to flows of materials and energy that establish the limits and strengths of its environmental performances by design; it lives and integrates smartly with the urban ecosystem it becomes part of, providing real *ecological services*. Immediately our thought goes to "Arcology" of Solerian memory, which unites the noble intent to minimize the environmental impact of buildings, in their whole life-cycle, with no longer utopian attempt to assign them an intrinsic ecological value, which in the definition of Total Value (Pearce and Turner, 1989) resides in that particle "e" that represents the ability of an ecosystem to be a habitat for its inhabitants.

Synergically with the evolution of the international debate on materials and design, if the technological choices follow the "Cradle-to-Cradle" approach,

the synergic relationship between the building and its environmental surroundings increases, not only for the balanced exchange of materials and energy in input and output of the building as an organism through its envelope, but also thanks to the genesis and epigenesis of its materials. The bio-based materials assume, in fact, the behaviour of a real living being that interacts, adapts, evolves, protects itself and gets the maximum benefit from the change of the surrounding conditions. Thus conceived, the building gives the necessary physical and technical support to the urban system it is part of, it works as a generator of ecosystem services and, according to the regenerative model, it uses solar energy and soil resources, it produces oxygen and captures CO<sub>2</sub>, it closes the cycle of water and waste, it breathes, it adapts to different seasons, it is built

CHARACTERISTICS	STANDARD	HEMP blend	ASPEN blend
Density ( lbs / ft3)	ASTM C303	7.6	9-15
Compressive strength (psi)	ASTM C165	18	50
Flexure strength (psi)	ASTM C203	34	-
Compostability (days)	ASTM D6400	30	-
Smoke emission (m2 / m2)	ASTM E84	50	311
Thermal conductivity [ 1 ], at 10°C (W / mK )	ASTM C518	0.039 <sup>2</sup>	-
Water vapour permeation (dry cup )	ASTM E96	30	-

Il componente non contiene formaldeide o VOC, potenzialmente nocivi, e la sua caratteristica di "materiale coltivato" offre la possibilità di alloggiare il composto in uno stampo con la possibilità di avere direttamente, dopo la coltivazione, un prodotto finito, adatto a diversi usi (materiale da costruzione, oggetto di design, packaging, ecc.).

**La sperimentazione DADI: risultati, rilevanza e implicazioni**

La sperimentazione condotta presso il DADI ha inteso testare la procedura di produzione di "materiali coltivati" ampliando la gamma di paglie utilizzate e confrontandone cinque diversi tipi (canapa – come benchmark di riferimento –, tabacco Burley, tabacco Virginia, grano duro e orzo) per verificarne la velocità e la capacità di attecchimento del micelio in base alle diverse quantità di lignina presenti.

La scelta delle paglie risponde alla logica dell'approccio "prosumer" (Bresso, 1993), che si ispira al modello gestionale degli ecosistemi naturali: il produttore (consumatore degli output di se stesso o di altri produttori, come avviene per il primo anello del ciclo naturale dei produttori primari), nel momento in cui opera tiene conto "a priori" che una parte significativa del prodotto, alla fine della vita utile, deve rientrare in un nuovo pro-

ducer (consumer of the outputs of himself or other producers, as happens in the first link of the natural cycle of primary producers), at the moment when he operates he takes into account "a priori" that a significant part of the product, at the end of its useful life, must return to a new pro-

ducer with natural materials (recycled and/or processing waste) that will be recyclable and/or totally reintegrated into the natural life-cycle at the end of their useful economic life. As a matter of fact, the control of the environmental balance directly affects the construction materials as input elements of the building process, nowadays strongly oriented to reduce not only the environmental impact in terms of Carbon Footprint, but also the embodied energy<sup>1</sup> of the materials used for building (Crawford, 2011). In this scientifically evolving panorama it is set the experimental research design for the production of bio-based thermal insulation materials, made in partnership between universities (DADI - Department of Architecture and Industrial Design of University of Campania "L. Vanvitelli") and industrial partners (SAIPAN srl, Nafco Italia

srl, Service Biotech s.r.l.), lenders and suppliers of services and raw materials for the experimental phase.

The research gets conceptual ideas from the study of biomaterials produced in Green Island (NY-the U.S.A.), the "Ecovative", made with mycelia and hemp straw or quaking aspen tree. This material is completely biodegradable and compostable; the mass of filamentous hyphae (the vegetative part of the thallus of a fungus) is intertwined with straws and forms a structure differently compact and minimally rigid with excellent insulating properties in a week or two.

The component doesn't contain formaldehyde or VOC, potentially harmful, and its characteristic of "grown materials" gives the possibility of setting the blend into a mold with the possibility of having directly a finished product, after cultivation, adapted to

cesso produttivo come input; deve, cioè, essere riciclabile, per quella parte che come rifiuto può essere riutilizzabile, ma deve anche essere biodegradabile per l'altra parte che non è riutilizzabile dall'economia umana, ma è ancora utilizzabile dall'economia del mondo naturale.

Per i "materiali coltivati", gli scarti di lavorazione di produzioni agricole locali sono la materia in input nel nuovo processo produttivo sperimentale, che per le modalità di esecuzione risulta essere a impatto ambientale zero e minima energia incorporata. Si prevede, infatti, l'uso di energia elettrica solo per il funzionamento degli apparecchi preposti alla trinciatura delle paglie, alla pastorizzazione e all'essiccazione del composto paglia-micelio alla fine della fase log. Gli elementi fondamentali della sperimentazione sono i miceli del pleutorus su miglio e l'uso di differenti paglie a confronto; nello specifico caso, sono stati realizzati 7 campioni:

- C.1 Grano non trinciato
- C.2 Tabacco Burley
- C.3 Orzo trinciato
- C.4 Orzo non trinciato
- C.5 Grano trinciato
- C.6 Canapa trinciata
- C.7 Tabacco Virginia

La preparazione del materiale è stata articolata in sei fasi:

- Fase 1. *Trinciatura* (lavorazione energivora), per la preparazione delle paglie.
- Fase 2. *Umidificazione e Fermentazione* delle paglie, bagnate periodicamente con acqua nebulizzata e fermentate in luogo chiuso per sette giorni; alla fine del trattamento le paglie presentavano variazione di colore e peso (me-

different uses (building materials, design object, packaging, etc.).

#### DADI experimentation: results, relevance and implications

The experimentation carried out at DADI has aimed at testing the production procedure of "grown materials" by expanding the range of straw used and comparing five different types (hemp - as a reference benchmark-, Burley tobacco, Virginia tobacco, durum wheat and barley) to check the rapidity and capacity of engraftment of the mycelium according to the different amount of lignin present.

The choice of the straws responds to the logic of the "prosumer" approach (Bresso, 1993), which is inspired to the management of natural ecosystems: the producer (a consumer of his/her own outputs or other manufacturers' outputs, as it happens for the first

step of the natural cycle of primary producers), when he/she acts, considers in advance that a significant part of the product, at the end of its useful life, must be part of a new production process as an input; that is it must be recyclable for that part which can be reusable as a waste and it must also be biodegradable for the other part which cannot be reusable by the human economy, but which is still usable by the economy of the natural world. For the "grown materials", the scraps of local crop productions are the input materials in the new experimental production process, that for the methods of execution results to be with a zero environmental impact and a minimum embodied energy. It is foreseen, in fact, the use of electricity only for functioning of the straw shredding machine, pasteurization machine and machine for drying the straw-mycelium com-

diamente circa +40%), con tracce evidenti di macrobiotici.

- Fase 3. *Sterilizzazione* (lavorazione energivora), con acqua a 100°C, per eliminare tutti i possibili batteri, potenziali inibitori della corretta proliferazione dei miceli.
  - Fase 4. *Inoculazione* del micelio, procedendo per strati.
  - Fase 5. *Coltivazione* del materiale, cercando di garantire una temperatura ambientale costante compresa tra i 35-40°C, ottimale per proliferazione dei miceli. Dopo solo due giorni dall'inoculazione, già si registravano presenze biotiche apprezzabili, diversamente manifeste nei diversi campioni: la crescita biotica a dieci giorni era maggiore nei tabacchi, rallentata nei composti a taglio lungo e nella canapa, quasi assente nei trinciati (Fig. 1). La principale variazione si è registrata nel fattore *temperatura dei campioni*; questi, nonostante le identiche condizioni ambientali esterne, registravano, rispettivamente: i tabacchi 42°C, le fibre a taglio lungo 34°C e i trinciati 22°C. Con molta probabilità tale differenza è dipendente dal diverso grado di umidità (acqua assorbita e/o trattenuta dalle fibre) dei composti.
  - Fase 6. Fermo della coltivazione (lavorazione energivora), ottenuta sottoponendo i campioni di materiale ad un aumento della temperatura in forno a 100°C, per bloccare la proliferazione delle ife e la sporulazione dei miceli.
- La migliore risposta, in termini di "tempo di coltivazione del materiale" è stata data dal C.2 Tabacco Burley e la migliore in termini di "consistenza materica" del prodotto finale ad uso edilizio, dal C.3 Orzo trinciato, C.7 Tabacco Virginia e C.6 Canapa trinciata.

pound at the end of the log phase. The essential elements of the experimentation are the mycelium of the pleutorus on mile and the use of different straws compared; in the specific case, 7 samples have been made:  
C.1 Unchopped wheat  
C.2 Burley tobacco  
C.3 Chopped barley  
C.4 Unchopped barley  
C.5 Chopped wheat  
C.6 Chopped hemp  
C.7 Virginia tobacco  
The preparation of the materials has been divided into six phases:

- Phase 1. *Shredding* (energivorous processing), for straw preparation.
- Phase 2. *Humidification and fermentation* of straw, periodically wet with water spray and fermented in a closed place for seven days; at the end of the

treatment straw assumed variation in colour and weight (about + 40% on average), with evident traces of macrobiotics.

- Phase 3. *Sterilization* (energivorous processing), with water at 100°C, to eliminate all possible bacteria, potential inhibitors of the correct mycelial proliferation.
- Phase 4. Mycelial *inoculation*, proceeding by layers.
- Phase 5. *Cultivation* of materials, trying to ensure a constant environmental temperature between 35-40°C, very good for mycelial proliferation. Only two days later the inoculation, there have been already appreciable biotic presences, differently manifested in the different samples: the

**La lettura del “materiale coltivato” al microscopio elettronico a scansione**

*Ecology*, un campo emergente nel design bio-orientato, in cui è significativa la persistenza di sinergie intrinseche tra vincoli ambientali, metodi di produzione ed espressione percettivo-funzionale del materiale realizzato. (Oxman, 2012).

Tuttavia, per la definizione di un paradigma di design veramente ecologico e coevolutivo era interessante capire le modalità di colonizzazione dei miceli, i veri artefici della struttura portante di questo materiale coltivato. A tal fine, i campioni sono stati osservati con microscopio elettronico a scansione.

Dalla matrice originaria dei campioni, in numero di otto<sup>3</sup>, sono stati prelevati frammenti in maniera random, rappresentativi della struttura madre. I campioni sono stati raccolti in VIAL da 1 ml e trattati in Osmio al 4% per 2 h 200 ml, successivamente sono stati eseguiti 2 lavaggi in PBS ph 7.4 200 ml con durata 25 min. Infine si sono sottoposti i campioni in disidratazione alcolica crescente da 30% a 95% per 25 min ognuno e ripetuto per 20 min a 95%. Infine i campioni sono stati sputterizzati in oro con sputter coater AGB 7366 e così ottenuti sono stati visualizzati mediante utilizzo di un microscopio SEM FEI, Quanta FEG 250<sup>4</sup>.

Si è evidenziato che il micelio ha colonizzato il grano trinciato più del grano non trinciato, in quanto il primo ha offerto mag-

giori spunti di penetrazione alle ife (Fig. 2). Nel grano non trinciato le ife hanno colonizzato soltanto lo strato esterno della cannula, lasciando apparentemente libero quello più interno (Fig. 7). Anche la metodica di crescita è stata differente, in quanto le ife hanno agganciato le paglie trinciate e le spore sono proliferate numerose perché hanno trovato resistenze minori (Fig. 8).

Nell'orzo la colonizzazione è stata più regolare per via della trabecolatura esterna a canali continui. L'organizzazione spaziale di ife e spore si è rivelata molto ben organizzata: le ife sono penetrate nella struttura esternamente liscia tramite i tagli della trinciatura e le spore hanno colonizzato solo la superficie esterna. In questo caso, le ife non avendo molti punti di ingresso, si sono dovute creare una maggiore possibilità di colonizzazione sporulando con più continuità: la rete di ife è, quindi, penetrata nei canali e ha gemmato. Nell'orzo non trinciato si è riscontrata la stessa struttura ordinata di ife e spore, ma i minori punti di ingresso hanno fatto sì che le ife siano penetrate prevalentemente nei canali esterni, non e/o poco interessando quelli più interni (Fig. 3). Nella canapa, il legame tra i diversi elementi lignei si è mostrato, invece, molto strutturato ed evidente (Fig. 4), con un andamento di proliferazione che è chiaramente apparso prevalentemente monodirezionale (Fig. 5), ma probabilmente il tempo di coltivazione è stato più lungo del necessario, in quanto oltre alla fitta rete di ife sono presenti molte spore.

Probabilmente, anche il processo di essiccazione, fatto in forno e non in autoclave, ha determinato una eccessiva sporulazione in

01 |



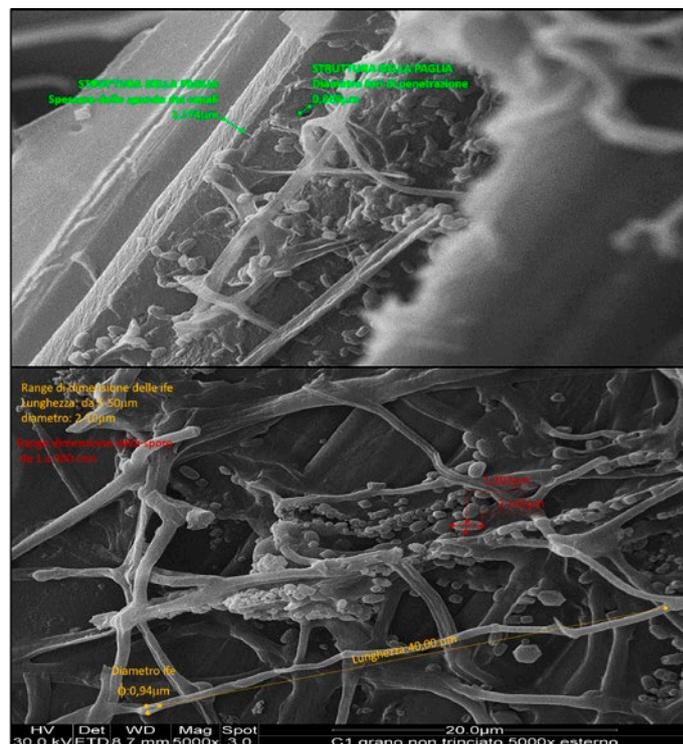
tutti i campioni di materiali coltivati. Infatti, il processo di autoclavatura, bloccando in fase vegetativa la proliferazione, evita la sporulatura.

Molto diversa appare la struttura del tabacco Barley che presenta una serie di canali organizzati a spirali, su cui le ife proliferano con poche spore. La colonizzazione avviene superiormente, poco interessando gli spazi interni delle spirali (Fig. 6).

Infine, il tabacco Virginia ha una struttura più propriamente lignea e le ife proliferano con le spore ma con andamento meno ramificato e più camminato, creando una struttura a legaccio tipo tralci di vite.

La lettura con il microscopio elettronico a scansione ha, di fatto, evidenziato che la crescita delle ife dipende non solo dall'ambiente proliferativo e dalle condizioni di temperatura e umidità a contorno (caratteristiche invariante per tutti i campioni in coltivazione), ma dalla morfologia e natura del supporto vegetale e in tutti i campioni è estremamente evidente il comportamento fortemente adattivo del micelio.

Il valore di questa sperimentazione consiste, quindi, nel cogliere le dinamiche bio-evolutive di questa materia prima vivente al fine di progettare, con consapevolezza biologica, le componenti della “mesh” fino a connettere, combinare, “coltivare”, tessere le bio-trame per formare superfici e volumi parametrizzabili in relazione alle diverse richieste prestazionali, con funzioni e caratteristiche performanti per il settore delle costruzioni. Il “materiale coltivato” cresce sulla base di un’appropriata combinazione tra le proprietà intrinseche del materiale biotico e i nessi ambientali esterni (prevalentemente temperatura e umidità relativa) che ne determinano le qualità potenziali, fissando non solo i parametri più generici riguardanti il comportamento meccanico, (durezza/ morbidezza, rigidità/elasticità, flessibilità /indeformabilità) e l’impatto ambientale (Energy e Carbon footprint), ma anche la resa spaziale e l’effetto percettivo<sup>5</sup>, componente non trascurabile nell’era della comunicazione e dell’espressività visiva dell’architettura.



za/ morbidezza, rigidità/elasticità, flessibilità /indeformabilità) e l’impatto ambientale (Energy e Carbon footprint), ma anche la resa spaziale e l’effetto percettivo<sup>5</sup>, componente non trascurabile nell’era della comunicazione e dell’espressività visiva dell’architettura.

### Analisi critica dei risultati conseguiti

Gli esiti della sperimentazione hanno registrato una risposta fortemente adattiva del materiale finale, pienamente rispondente all’approccio del Regenerative Design (edifici in armonia con il ciclo vitale naturale e con impronta ecologica bassissima – Reed, 2008; Attia, 2018) e del Design eco-sociale, che enfatizza la recuperata connessione dia-

ten-day biotic growth has been greater in the tobaccos, slowed down in the long cut compounds and in the hemp, almost absent in the chopped ones (Fig. 1). The main variation has been recorded in the temperature factor of the samples; despite the identical external environmental conditions, they have been recorded, respectively: 42°C for tobaccos, 34°C for long cut fibres and 22°C for chopped fibres. This difference probably depends on the different degree of humidity (water absorbed and/or retained by the fibres) of the compounds.

Phase 6. Stop growing (energivorous processing), obtained by putting the samples of materials to an increasing temperature

in an oven at 100°C, in order to block hyphae proliferation and mycelial sporulation.

The best response, in terms of “grown materials time” has been given by C.2 Burley Tobacco and the best response in terms of “materials consistency” of the final product for building use has been given by C.3 Chopped burley, C.7 Virginia tobacco and C.6 Chopped hemp.

### “Grown materials” analysed by a scanning electron microscope

The experimentation has produced satisfactory results within advanced production methods of *Material Ecology*, an emerging field in bio-oriented design, where it is meaningful the persistence of intrinsic synergies among environmental constraints, production methods and perceptive-functional expression of the materials produced (Oxman, 2012).

However, in order to define a really ecological and co-evolutionary design paradigm, it has been interesting to understand how to colonize mycelia, the real architects of the supporting structure of the grown materials. For such an aim, the samples have been observed with a scanning electron microscope.

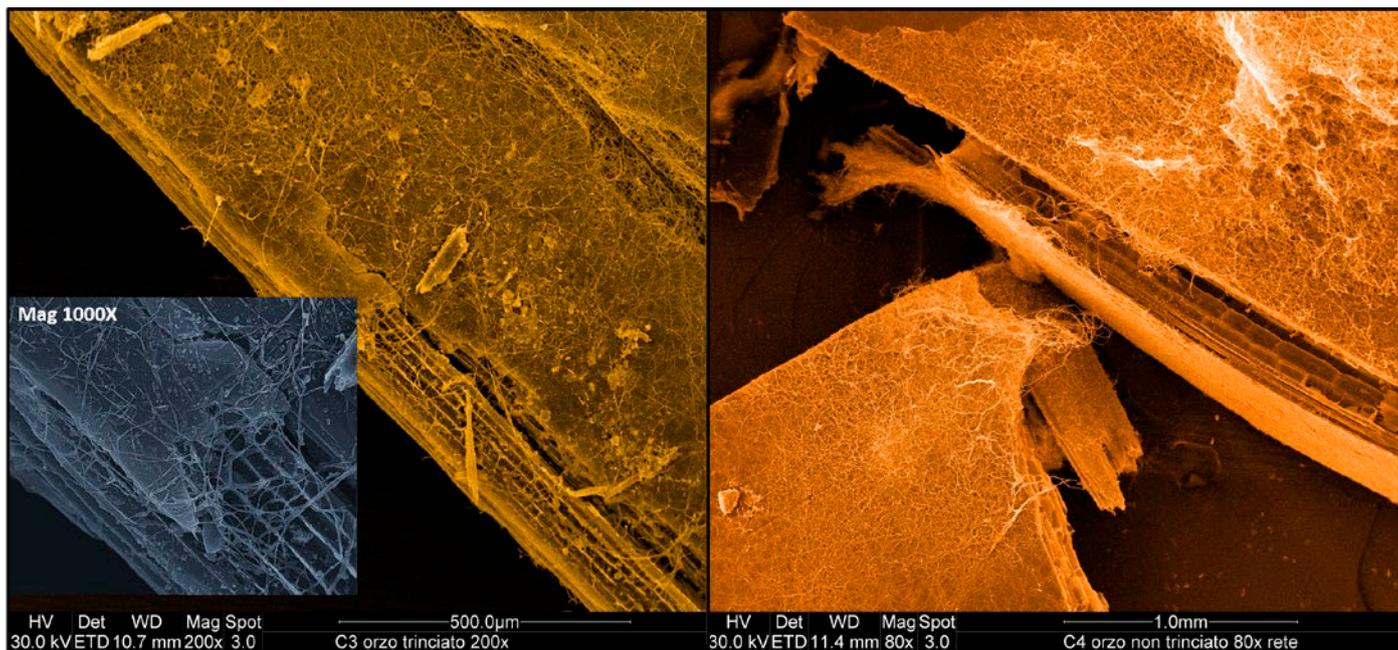
Fragments, representative of the mother structure, have been randomly collected in number of eight<sup>3</sup> from the original matrix of the samples. The samples have been collected in 1-ml VIAL and treated in 4% Osmium for 2h 200 ml, then 2 washes have been performed in PBS pH 7.4 200 ml with a 25 min duration. Then, the samples have been subjected to an increasing alcohol dehydration from 30 to 95% for 25 min each and repeated for 20 min at 95%. Finally, the samples have been sputtered in gold with sputter

coater AGB 7366 and, thus obtained, they have been visualized using a FEI Quanta 250 FEG SEM<sup>4</sup>.

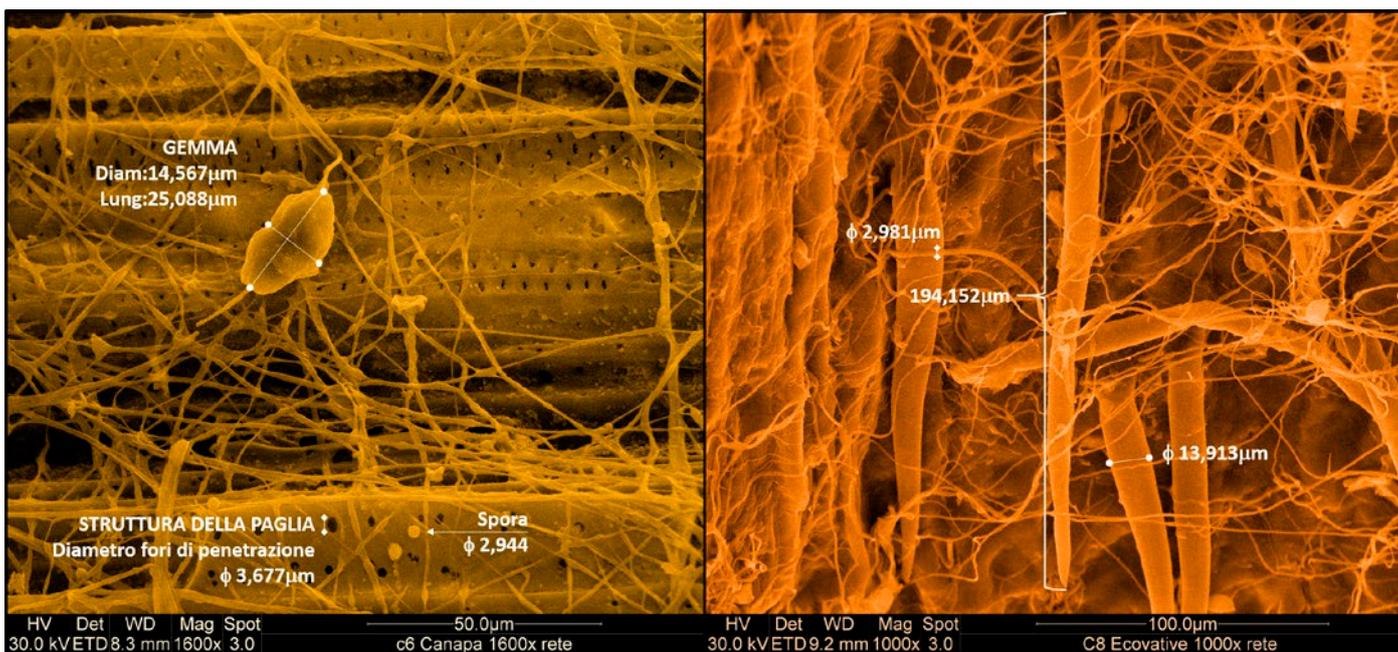
It has been shown that the mycelium has colonized the chopped more than the unchopped wheat, since the former has offered more penetration points to the hyphae (Fig. 2). In the unchopped wheat the hyphae have colonized only the outer layer of the cannula, apparently leaving the inner layer free (Fig. 7). Also the method of growth has been different, as the hyphae have hooked the chopped straws and the spores have proliferated numerous because they have found less resistance (Fig. 8).

In the barley, colonization has been more regular due to the external trabeculation of continuous channels. The spatial organization of hyphae and spores have revealed to be very well organized: the hyphae have been pen-

03 |



04 |

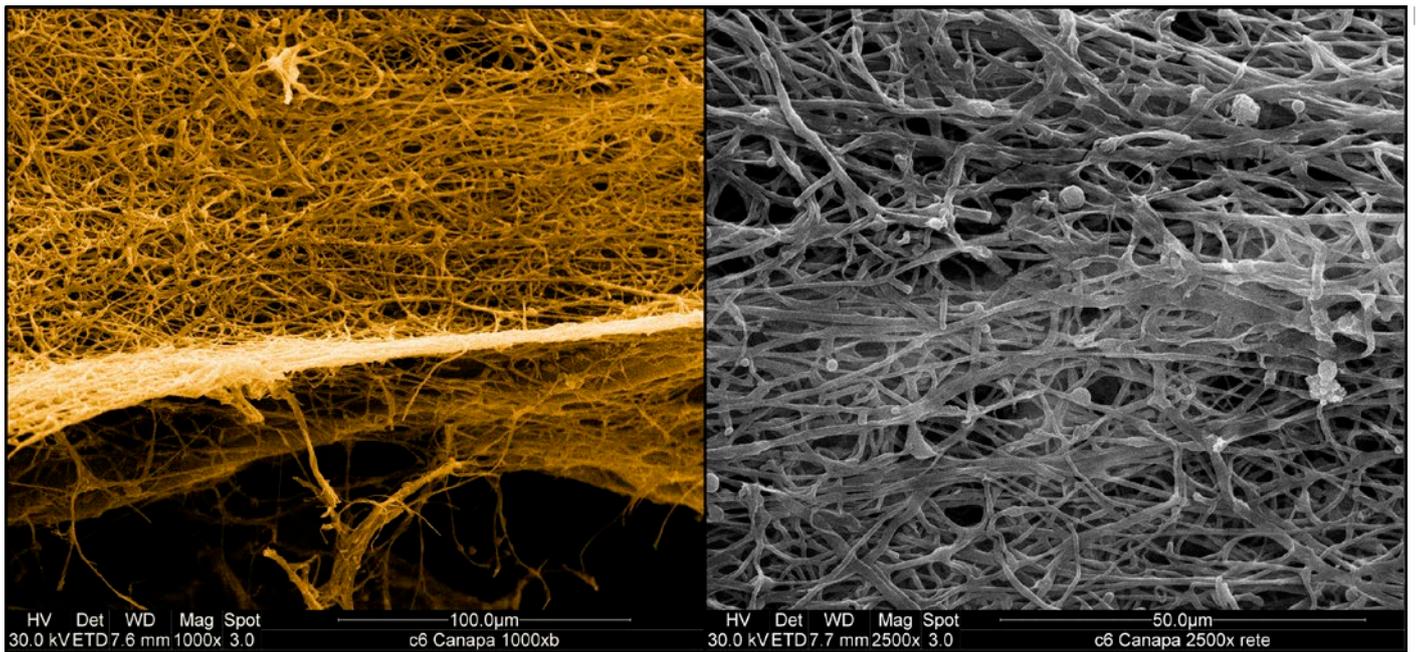


etrated in the externally smooth structure through the cuts of the shredding and the spores have colonized only the outer surface. In this case, not having a lot of entry points, it was necessary for the hyphae to create a greater chance of colonization sporulating with more continuity: the hyphae network has, therefore, penetrated into the channels and has budded. In the unchopped barley the same ordered structure of hyphae and spores has been found, but

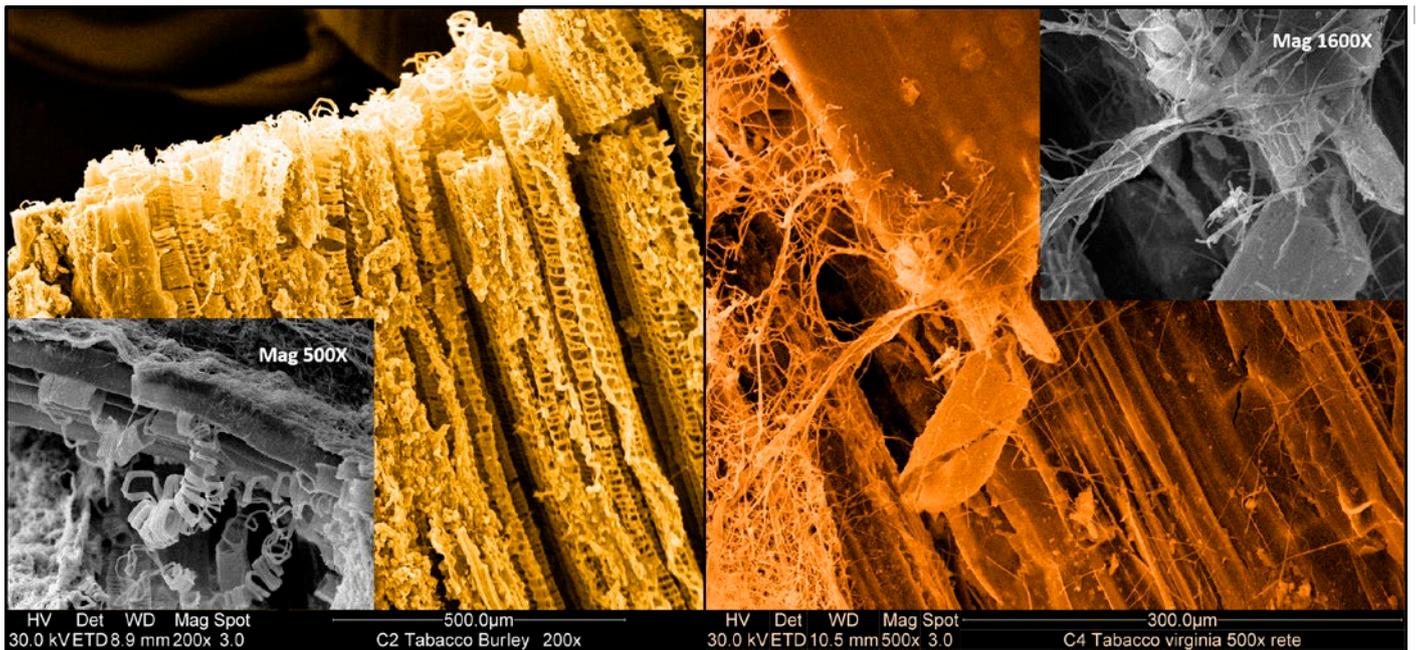
fewer entry points have meant that the hyphae have penetrated mainly in the external channels, not and/or little interested in the innermost ones (Fig. 3). In the hemp, the link among the various wooden elements has revealed to be, however, very structured and evident and (Fig. 4) with a proliferation trend which is clearly appeared predominantly unidirectional (Fig. 5); probably the cultivation time has been longer than it was necessary, since

there are many spores in addition to the dense network of hyphae. Probably, even the drying process, made in oven and not in autoclave, has caused an excessive sporulation in all the samples of grown materials. The autoclaving process, in fact, blocking proliferation at a vegetative stage, avoids sporulation. The Barley tobacco structure appears very different, presenting a series of spirally organized channels, on which

the hyphae proliferate with few spores. Colonization occurs upper, little affecting the internal spaces of the spirals (Fig. 6). Finally, the Virginia tobacco has a more properly wooden structure and hyphae proliferate with spores, but with a less branched and a more walked trend, creating a ligature structure similar to vine shoots. The scanning electron microscope analysis has practically highlighted



| 05



| 06

that the growth of hyphae depends not only on the proliferative environment and on the temperature and humidity conditions at the boundary (invariant characteristics for all the samples in cultivation), but on the morphology and nature of the vegetable support and in all the samples, it is extremely evident the strongly adaptive behaviour of the mycelium. The value of this experimentation consists, therefore, in understanding the

bio-evolutive dynamics of the living raw materials in order to design, with biological awareness, the components of the “mesh” up to connect, combine, “cultivate”, weave the bio-textures to form surfaces and volumes that can be parameterised according to the different performance requirements, with functions and performance characteristics for the construction sector. The “grown materials” grow on the basis of an appropriate combination between

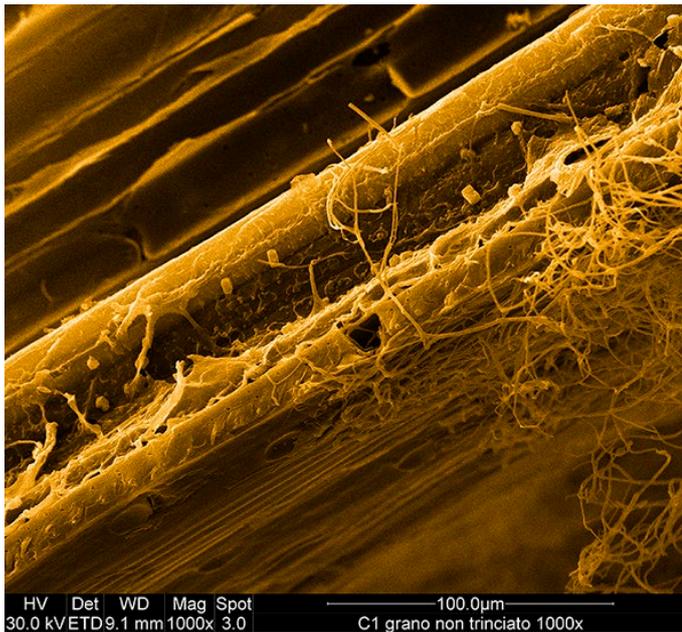
the intrinsic properties of biotic materials and the external environmental connections (mainly temperature and relative humidity) that determine its potential qualities, fixing not only the most general parameters concerning the mechanical behaviour, (hardness/softness, stiffness/elasticity, flexibility/deformability) and the environmental impact (Energy and Carbon footprint), but also the spatial rendering and the perceptive effect<sup>5</sup>, a non-negligible

component in the era of communication and visual expressiveness of architecture.

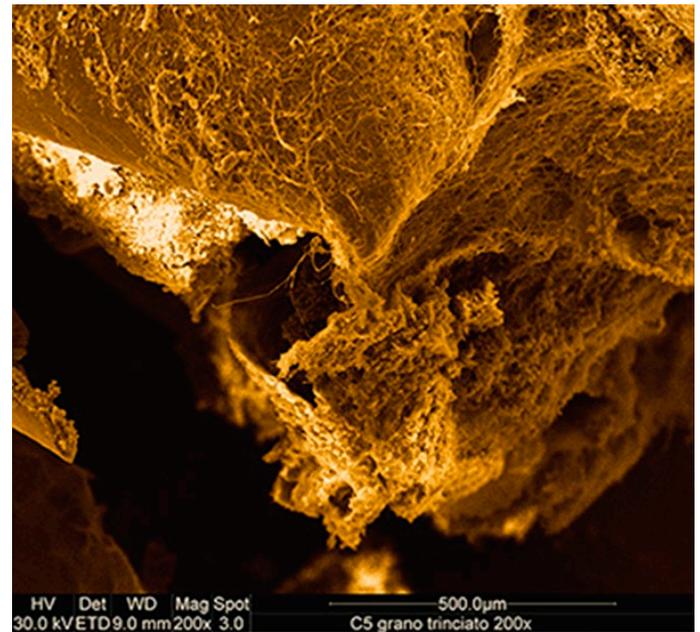
**Critical analysis of the achieved results**

The results of the experimentation have registered a highly adaptive response of the final materials, fully responsive to the Regenerative Design approach (buildings in harmony with the natural life-cycle and with a very

07 | Proliferazione esterna dei miceli su C.1 grano non trinciato – i miceli sono riusciti a permeare solo nello strato più esterno della cannula; lo strato interno appare libero da ife  
*External proliferation of mycelia on C.1 unchopped wheat – mycelia have managed to permeate only in the outermost layer of the cannula; the inner layer seems to be free from hyphae*



08 | Proliferazione su campione C5 Grano trinciato  
*Proliferation on the sample C.5 chopped wheat*



lettica tra natura/ambiente/benessere ed essere umano (Birkeland, 2002).

Analizzando l'impatto ambientale di tutto il processo, l'Impronta di Carbonio è risultata trascurabile. Infatti, le emissioni di CO<sub>2</sub> sono state stimate pari a 31 Kg/m<sup>3</sup> e il consumo di energia pari a 652 MJ<sup>6</sup>, valori estremamente significativi se confrontati con l'energia necessaria per la produzione dei materiali da costruzione tradizionali, i cui valori di Embodied Energy e Embodied Carbon sono riportati nel database "Inventory of Carbon & Energy" (ICE) dell'Università di Bath nel Regno Unito (Hammond e Jones, 2008).

Si tratta, dunque, di un processo estremamente eco-compatibile e resiliente, a matrice più che rinnovabile, in grado di esercitare in

low ecological footprint - Reed, 2008, Attia, 2018) and of eco-social Design, which emphasizes the recovered dialectical connection among nature/environment/ wellness and human being (Birkeland, 2002).

By analyzing the environmental impact of the whole process, the Carbon Footprint has revealed to be negligible. The CO<sub>2</sub> emissions, in fact, have been estimated to be equal to 31 Kg/m<sup>3</sup> and the energy consumption equal to 652 MJ<sup>6</sup>, extremely significant values when compared to the energy required for the production of traditional building materials, whose values of Embodied Energy and Embodied Carbon are reported in the database "Inventory of Carbon & Energy" (ICE) of the University of Bath in the United Kingdom (Hammond and Jones, 2008).

It is, therefore, an extremely eco-friendly and resilient process, with a

more than renewable matrix, able to make a meaningful conceptual breakthrough as well as a market success, in the production of natural materials for buildings, and not only, in the nearest future. From the performance point of view, the evaluation of the technical parameters of the panels produced (standardized with the characteristic parameters of the building elements foreseen by the Decrees DD.MM. 26/06/2015) has allowed to underline the added value of the regenerative approach of the bio-based insulating materials, comparing them with two other examples of insulating materials: cork and EPS, evaluating them with the Performances/Environmental costs parameter and comparing them on the basis of four categories of indicators derived from the ISO 21929-1: 2011 standard, divided into functional phases: 1. Production; 2. Construction;

un prossimo futuro una significativa svolta concettuale oltre che di mercato, nella produzione di materiali naturali per le costruzioni ... e non solo. Dal punto di vista prestazionale, la valutazione dei parametri tecnici dei pannelli prodotti (in linea con i parametri caratteristici degli elementi edilizi previsti dai DD.MM. 26/06/2015) ha permesso di sottolineare il valore aggiunto dell'approccio rigenerativo dei materiali isolanti a base biologica, confrontandoli con altri due esempi di materiali isolanti: sughero ed EPS, valutandoli con il parametro Prestazioni/Costi ambientali e confrontandoli in base a quattro categorie di indicatori dedotti dalla norma ISO 21929-1: 2011, articolate in fasi funzionali: 1. Produzione; 2. Costruzione; 3. Esercizio; 4. Fine vita.

3. Operation; 4. End of life.

This experimentation connects traditional functions and innovative performances. So will synthetic biology design and build new materials, systems and living components made up of algae, fungi and bacteria? Certainly, new scenarios are set up, which appear utopian to the most at the moment, but which are fueled by the engine of innovation and supported by the principle of "Environmentally-friendly Behaviour".

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to: S. Del Prete - Service Biotech srl - for collaboration in preparing the samples and analyzing them with the scanning microscope; the VALERE Program of the University of Campania "L. Vanvitelli" that assigns and dissemination of open access research products.

#### NOTES

<sup>1</sup> Only as an example, it is shown that in quite all buildings built in Italy before the entry into force of the Law 373/76, the energy required in the operational phase (to meet the requirements under standard conditions for heating, cooling, illumination, ventilation and production of sanitary hot water) can be equal to – and in some case can even exceed – the energy consumption of the whole useful life of the building, for a period of 50 years (Campioli et al, 2010).

<sup>2</sup> The following values are indicated as reference parameters: expanded vermiculite = 0.070 W/mK; cork = 0.052W/mK; extruded polystyrene (XPS) in sheets = 0.040W/mK; polyurethane foam = 0.034 - 0.032W/mK.

<sup>3</sup> In addition to the seven samples cultivated at DADI, a sample of Ecovative has been analyzed as a reference benchmark.

Questa sperimentazione mette in connessione funzioni tradizionali e prestazioni innovative. Sarà, dunque, la biologia sintetica a progettare e costruire nuovi materiali, sistemi e componenti viventi fatti di alghe, funghi e batteri? Certo, si configurano nuovi scenari, che al momento, ai più, appaiono utopici, ma che sono alimentati dal motore dell'innovazione e sostenuti dal principio del "Comportamento Ambientalmente Consapevole".

#### NOTE

<sup>1</sup> Solo a titolo di esempio è dimostrato che in quasi tutti gli edifici realizzati in Italia prima dell'entrata in vigore della Legge 373/76, l'energia necessaria nella fase operativa (per soddisfare il fabbisogno in condizioni standard per riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria) può, in un periodo di 50 anni, eguagliare - e in alcuni casi superare - il consumo di energia dell'intera vita utile dell'edificio. (Campioli et al, 2010).

<sup>2</sup> Come parametri di riferimento si indicano i valori di: vermiculite espansa = 0,070 W/mK; sughero = 0,052W/mK; polistirolo estruso (XPS) in lastre = 0,040W/mK; poliuretano espanso = 0,034 - 0,032W/mK.

<sup>3</sup> Oltre ai sette campioni coltivati presso il DADI è stato analizzato un campione di Ecovative, come benchmark di riferimento.

<sup>4</sup> La preparazione dei campioni effettuata presso i laboratori della Service Biotech srl, e l'osservazione al microscopio elettronico sono ad opera del dott. Salvatore Del Prete. I parametri di settaggio sono stati: Work Distance (WD) pari a 10.0 mm e High Voltage (HV) pari a 30.0 kV.

<sup>5</sup> Gli sviluppi futuri della ricerca sono fortemente orientati al settore del Green-Design.

Valori calcolati per l'Ecovative. Fonte: <https://www.slideshare.net/funk97/ecovative-mushroom-material> (accesso 5 Aprile 2018).

<sup>4</sup> Sample preparation, carried out at Service Biotech srl laboratories, and observation with electronic microscope are by dott. Salvatore Del Prete. The setting parameters have been: Work Distance (WD) equal to 10.0 mm and High Voltage (HV) equal to 30.0 kV.

<sup>5</sup> Future research developments are strongly oriented towards the Green-Design sector.

Values calculated for the Ecovative. Source: <https://www.slideshare.net/funk97/ecovative-mushroom-material> (accessed 5 April 2018).

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia: S. Del Prete - Service Biotech srl - per la collaborazione nel preparare i campioni e analizzarli con il microscopio a scansione; il Programma VALERE dell'Università della Campania "L. Vanvitelli" che assegna contributi per la pubblicazione e la diffusione di prodotti di ricerca ad accesso aperto.

#### REFERENCES

Attia, S. (2018), *Regenerative and Positive Impact Architecture*, SpringerBriefs in Energy Springer, Cham, CH.

Bresso, M. (1993), *Per un'economia ecologica*, La Nuova Italia Scientifica, Roma, IT, pp. 43-58, 75-82.

Birkeland, J. (2002), *Design for Sustainability: A Sourcebook of Integrated Ecological Solutions*, Earthscan Publications Ltd, London, UK.

Campioli, A., Giurdanella, V. and Lavagna, M. (2010), "Energia per costruire, energia per abitare", *Costruire in laterizio*, n. 134/2010, pp. 60-65.

Crawford, R.H. (2011), *Life Cycle Assessment in the Built Environment*, Taylor and Francis, London, UK.

Hammond, G.P. and Jones, C.I. (2008), "Embodied energy and carbon in construction materials", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Energy* 161, May 2008 Issue EN2 pp. 87-98.

McDonough, W. and Braungart, M. (2010), *Cradle to cradle: remaking the way we make things*, MacMillan, London, UK.

Oxman, N. (2012), "Programming Matter: Architectural Design", *Special Issue: Material*

*Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, Vol. 82, No. 2, pp. 88-95.

Pearce, D.W., Turner, R.K. (1989), *Economia delle risorse naturali e dell'ambiente*, Il Mulino, Bologna.

Reed, B. (2009), *The Integrative Design Guide to Green Building: Redefining the Practice of Sustainability*, John Wiley&Sons Ed., New Jersey, USA.

Steadman, P. (1988), *L'evoluzione del design. Analisi biologica in architettura e nelle arti applicate*, Liguori Editore, Naples.