



MATERIALI VIVENTI DA BATTERI E FUNGHI

Alcuni batteri consentono la produzione di materiali cementizi autoriparanti, mentre altri sono in grado di formare biomattoni autoreplicanti completamente riciclabili. Anche i miceli fungini possono facilmente colonizzare svariati prodotti vegetali per produrre biomattoni autoriparanti in grado di comportarsi da materiali intelligenti in bioedilizia. Molti altri settori applicativi, dall'abbigliamento all'alimentazione, sono già coinvolti o sono previsti in un prossimo futuro.



Introduzione

Nel 2018 la National Science Foundation ha definito quali *materiali viventi* quei materiali, composti interamente o parzialmente da cellule viventi, che costituiscono il materiale stesso o contribuiscono ad ottenerlo e a modulare le sue prestazioni funzionali [1, 2]. Nello stesso anno l'NSF, dopo una vastissima indagine chiamata *Idea Machine* [2], ha posto i materiali viventi ingegnerizzati tra le principali priorità di indagine scientifica e di applicazione tecnologica, in grado di affrontare con successo le sfide drammatiche e colossali poste dai cambiamenti climatici offrendo la massima resilienza possibile nei confronti dei problemi di inquinamento, di invecchiamento delle strutture e di possibili ca-

tastrofi, siano esse naturali o dovute a altre cause. È possibile ottenere materiali viventi sia da batteri sia da funghi con due differenti impostazioni, illustrate sommariamente qui di seguito. In un futuro molto prossimo si svilupperanno numerosissime applicazioni a partire da questi approcci, che possono rientrare tutti nelle due suddivisioni seguenti: nel caso dei batteri vengono messe a punto ingegnose applicazioni del ben noto processo di biomineralizzazione, mentre per l'utilizzo dei funghi si impiega il processo di colonizzazione del loro micelio. I più interessanti sviluppi di queste applicazioni riguardano *in primis* tre settori, quali la bioedilizia, la bioarchitettura e il biodesign, ma sono già presenti anche molte altre applicazioni in aree impensabili fino a qualche anno fa.



Materiali viventi creati dai batteri per la bioedilizia

La biomineralizzazione, come già accennato, è un processo molto noto e molto studiato. Alcuni microrganismi, compresi i funghi, possono portare alla formazione di diversi minerali (ad es. calcite, caolinite, fluorite, vaterite). Tra di essi ha particolare rilievo la calcite, costituita da carbonato di calcio, con cui si sono formati sedimenti marini, grotte e suoli calcarei, etc. Le conchiglie dei molluschi marini, i gusci delle lumache, gli scheletri dei coralli sono il risultato di processi di biomineralizzazione mediati da microrganismi.

La precipitazione di carbonato di calcio da parte dei microrganismi carbonatogeni è controllata da tre fattori:

- 1) dalle concentrazioni di calcio e carbonio inorganico disciolti nello specifico ambiente;
- 2) dal pH di quest'ultimo;
- 3) dalla disponibilità di siti di nucleazione.

La sua forma cristallografica dipende dalla composizione e dalla struttura del substrato con cui i batteri interagiscono: per es. *Brevundimonas diminuta* (batterio Gram negativo) porta alla formazione di vaterite (carbonato di calcio cristallizzato in un sistema esagonale). I processi di biomineralizzazione con formazione di carbonato di calcio per opera



Fig. 2 - Preparazione in laboratorio di un mattone autoreplicante [5]

di attinobatteri sembrano giocare un ruolo di primo piano nella formazione di stalattiti e stalagmiti [3]. Si tratta di rimarchevoli scoperte che potrebbero spiegare l'influenza delle attività biologiche sui processi geologici in atto non solo sulla terra, ma anche in altri pianeti.

Due aspetti non secondari di questi processi innovativi sono rappresentati dal loro rilevante contributo alla riduzione dell'effetto serra e al risanamento ambientale (*bioremediation*).

I progetti di ricerca più interessanti di questi ultimi anni hanno principalmente coinvolto in modo sinergico microbiologi, biotecnologi e scienziati dei materiali (ma non solo, come vedremo in seguito), in una serie di approcci multidisciplinari che hanno suggerito possibili rivoluzionarie applicazioni in svariati settori applicativi. In particolare, il settore dell'edilizia risulta a tutt'oggi quello che ha maggiormente beneficiato di queste scoperte. I due risultati più rilevanti e ricchi di interessanti risvolti applicativi sono il calcestruzzo autoriparante e i biomattoni autoreplicanti.

Il calcestruzzo autoriparante

Per ottenere cementi e calcestruzzi che si riparano da soli si incapsulano numerose famiglie di spore di batteri assieme a una fonte di calcio

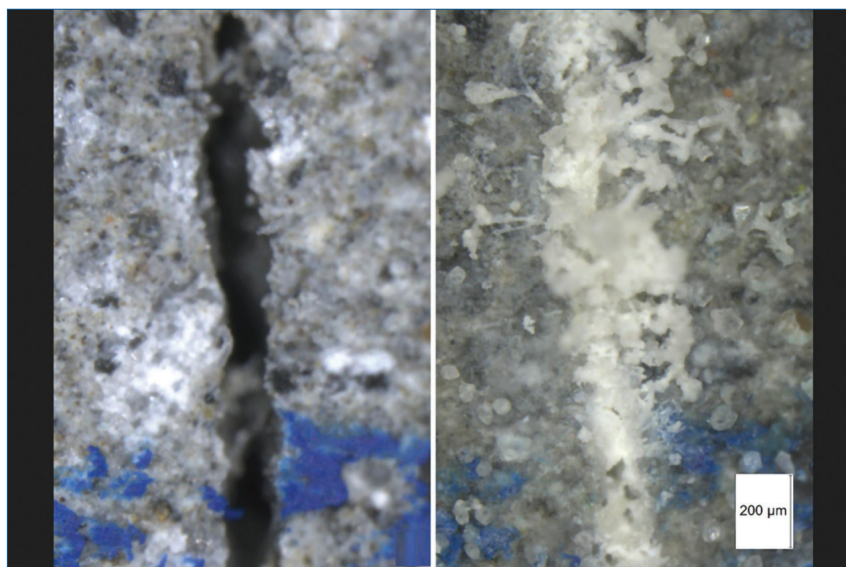


Fig. 1 - Calcestruzzo microfessurato (a sx) e risanato (a dx) [4]

durante la preparazione della matrice cementizia. Le microincapsulazioni, ad es. in polimeri superassorbenti, consentono di resistere agli ambienti fortemente basici del calcestruzzo (pH 12-13). Quando le microfessurazioni rompono l'incapsulamento e l'acqua penetrata attiva le spore, si ha la produzione *in situ* di carbonato di calcio, che riempie completamente le microfessurazioni [4] (Fig. 1). A fine operazione i batteri si incistano nuovamente e possono conservarsi perfino per 200 anni. Cementi e calcestruzzi contenenti batteri microincapsulati rappresentano a pieno titolo un esempio di materiali viventi.

I biomattoni autoreplicanti

Nel 2020 un team di ricercatori della Colorado University a Boulder ha creato il biomattone autoreplicante [5], un materiale cioè che grazie ad una specifica famiglia di batteri può autoriprodursi generando un certo numero di biomattoni 'figli' senza perdere le proprie caratteristiche fisico-meccaniche. Si tratta di cianobatteri del genere *Synechococcus*, che si attivano per opera della luce solare e assorbono CO₂ per sintetizzare molecole organiche. Mescolati con sabbia, acqua ed una fonte di calcio producono carbonato di calcio. Per ottimizzare la crescita batterica viene anche aggiunta della gelatina che, sciolta in acqua e raffreddata, forma un gel mediante legami a idrogeno tra le sue molecole, fornendo un'efficiente impalcatura ini-

ziale per la semina di carbonato di calcio. In questo modo il gel si trasforma man mano in un composto mineralizzato più duro. Dopo 8 ore circa si forma un materiale naturale e vivente con un'apprezzabile resistenza meccanica (Fig. 2).

Il biomattone è in grado di autoreplicarsi. Infatti, è possibile suddividere il biomattone in due parti da inserire in due stampi. Aggiungendo le giuste quantità di gelatina, sabbia e fonte di calcio si ha la duplicazione del biomattone per opera dei batteri tuttora attivi. Da un mattone *genitore* si arriva a produrre fino a otto mattoni figli in tre generazioni senza perdere sostanzialmente le proprietà originali e con indubbi vantaggi ambientali rispetto ai tradizionali processi di produzione. È ben noto, infatti, che l'industria del cemento contribuisce al 7% circa delle emissioni totali di CO₂ in atmosfera. Il biomattone così prodotto costituisce un materiale da costruzione vivente e a fine vita è totalmente riciclabile secondo i principi dell'economia circolare.

Materiali viventi creati dai funghi per la bioarchitettura

I funghi possono sostituire il cemento e i materiali tradizionali. In particolare, è il micelio fungino che viene utilizzato in modo ingegnoso e spettacolare. Il micelio è costituito da una fitta rete di cellule filamentose (ife), che sono in grado di colonizzare le materie vegetali con cui vengono a contatto, cioè di convertirle in ulteriori miceli. Ancora una volta, si

tratta di un'alternativa molto interessante rispetto ai materiali tradizionali in quanto i materiali derivanti dal micelio colonizzatore sono al 100% naturali, compostabili e provenienti da rifiuti di basso valore, mentre l'insieme dei materiali da costruzione e l'edilizia nel suo complesso sono responsabili del 40% circa di emissioni di CO₂ a livello globale. Di per sé il micelio è ignifugo, ecosostenibile e rispettoso dell'ambiente per le sue ridotte emissioni di carbonio e di sostanze inquinanti. È anche in grado di autoripararsi e biodegradarsi molto facilmente, oltre che essere leggero e durevole.

Ricercatori della Columbia Graduate School of Architecture, Planning and Preservation dello Stato di New York hanno



Fig. 3 - Padiglione di 12,2 m di fronte al MOMA (Progetto *The Living*) [6]



realizzato un biomattone mettendo a contatto il micelio fungino con paglia o scarti di mais per 14 giorni circa. Dopo aver colonizzato il materiale vegetale a contatto il micelio è stato disattivato per riscaldamento o trattamento chimico e i biomattoni risultanti, costituiti da solo materiale organico, hanno portato all'ottenimento di un padiglione [6], alto più di 12 metri, posto all'ingresso del Museum of Modern Art (MOMA) di New York nel 2014 (Fig. 3).

Il padiglione è stato smantellato alla fine della mostra dopo due mesi e avviato al compostaggio con uno smaltimento completamente sicuro per l'ambiente. In prospettiva, si pensa di creare biomattoni monolitici ad opera di micelio vivente, in grado di autoripararsi e di rispondere a impulsi elettrici (sistemi *smart*).

Anche l'Unione Europea nell'ambito di Horizon 2020 [7] ha finanziato un progetto multidisciplinare

di ricerca, chiamato FUNGAR (Fungal Architectures) e intitolato *Edilizia con tecnologie basate sul micelio*, a cui ha partecipato anche una piccola, ma vivace società italiana (MOGU Srl) assieme a un team inglese, un gruppo danese e uno olandese. Ci si è proposti di sviluppare un substrato strutturale che utilizzasse micelio fungino vivo infuso con nanoparticelle e polimeri per creare edifici capaci di crescere e ripararsi da soli, adattandosi al tempo stesso all'ambiente circostante. A tal fine, il progetto ha raccolto un vasto spettro di competenze: architetti, micologi, designers, informatici, biofisici, oltre ad esperti di nanotecnologie, di polimeri e di tecnologie basate sul micelio.

Altre applicazioni fungine

Nei pressi del reattore di Chernobyl è stato recentemente individuato un fungo (*Cladosporium sphaerospermum*) che sembra in grado di 'catturare' le radiazioni [8]. Si immaginano già scudi antiradiazioni per le capsule spaziali in grado di proteggere gli astronauti dai raggi cosmici nelle missioni di lunga durata. Anche le tute spaziali e gli habitat delle capsule, inserendo una membrana fatta di questo fungo, saranno in grado di salvaguardare la salute degli astronauti. Inoltre, la NASA, l'ente spaziale statunitense, sta valutando la possibilità concreta di utilizzare azioni sinergiche di batteri e funghi per creare moduli abitativi su Marte e altri pianeti [9].

Tra le altre inusuali applicazioni del micelio fungino si può anche segnalare la realizzazione da parte di una start-up olandese [10] di una bara in micelio, che accelera in modo significativo - da un decennio circa a quasi due anni - il tempo necessario a una salma per decomporsi. Non solo, in questo modo si elimina il legno laccato e il metallo, che spesso decorano le bare tradizionali e che impiegano decenni per dissolversi, e allo stesso tempo si fornisce nutrimento per il terreno.

Nel tessile un'azienda olandese [11], utilizzando la tecnologia di stampa 3D, ha sviluppato un tessuto a partire dai miceli di alcuni funghi, fatti crescere a forma di disco e poi uniti tra loro per formare abiti senza cuciture. La loro peculiarità è che, una volta dismessi, semplicemente si decompongono.

Nella moda marche importanti quali Adidas, Lululemon, Kering e Stella McCartney, unendosi in un consorzio [12] hanno avviato progetti che vedono

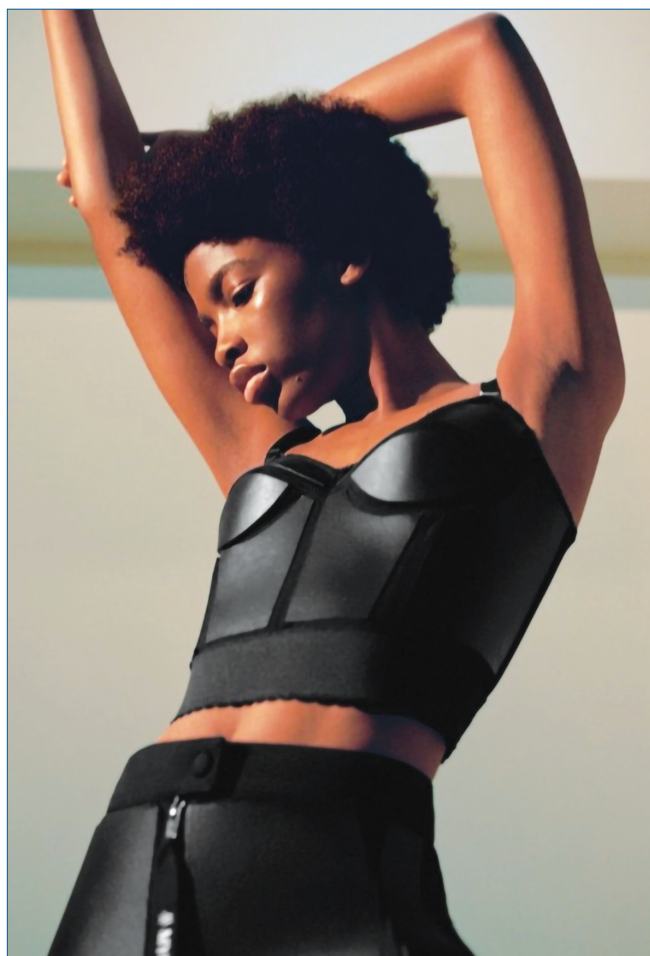


Fig. 4 - Dalla collezione di Stella McCartney, stilista e fondatrice dell'omonimo marchio vegano [12]

come protagonista il micelio. Attraverso la start-up Bolt Threads hanno sviluppato industrialmente un materiale simile al cuoio chiamato Mylo™ che cresce in provetta in meno di due settimane ed è molto più sostenibile di quello di origine animale (Fig. 4). Con questo materiale sono stati creati *sneakers*, borsette, abiti ed altro ancora.

Anche Hermès in collaborazione con la start-up Mycoworks ha creato un nuovo materiale denominato Sylvania, ottenuto con la tecnologia brevettata *Fine Mycelium*, che rappresenta una nuova generazione di biomateriali ibridi [13].

Il micelio sembra quindi il prodotto del futuro. La start-up statunitense Ecovative Design ha autofinanziato il progetto *Mycelium Foundry* con applicazioni in svariati campi, quali l'alternativa vegetale al *bacon*, la creazione di schiume di micelio per l'industria tessile e cosmetica, materiali per *packaging* ed imballaggi biodegradabili [14]. I miceli potranno anche fungere da potenziali sensori ambientali, vista la loro capacità di reagire a stimoli esterni come luce, temperatura, presenza di sostanze chimiche e altro.

I miceti e i loro miceli sono già al centro dell'attenzione da parte delle industrie e di molti ricercatori di tutto il mondo, come evidenziato da numerosi *report* sui *trend* mondiali a cura di agenzie di previsioni di tendenze globali [15]. L'effetto fungo riguarderà moltissimi campi, quali ad es. cosmesi, moda, prodotti salutistici e nutraceutici, imballaggi alternativi a basso impatto sull'ambiente. Del resto, la fantascienza aveva già anticipato la realtà: nel 2017 la serie *StarTrek Discovery* utilizzava il micelio come carburante per la nave spaziale *USS Discovery-NCC1031* e il suo motore a spore permetteva di fare salti nello spazio e in altri universi alternativi partendo dal cosiddetto piano miceliale [16].

BIBLIOGRAFIA

- [1] NSF 2026 Idea Machine: Living Materials, <https://nsf2026imgallery.skild.com/entries/living-materials/>
- [2] The NSF Idea Machine, National Science Foundation 2018, https://www.nsf.gov/news/special_reports/nsf2026ideamachine/about.jsp
- [3] T. Sallsted, M. Ivarsson *et al.*, *Int. J. Speleology*, 2014, **43**, 305.
- [4] H.M. Jonkers, R.M. Mors *et al.*, Biotech solutions for concrete repair with enhanced durability, Ch. 12, in *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*, Woodhead Publ., 2016, 253, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100214-8.00012-9>
- [5] C.M. Heveran, S.L. Williams *et al.*, *Matter* 2020, **2**, 481, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.11.016>
- [6] *Embodied Energy and Design, Making Architecture between Metrics and Narratives*, Columbia University GSAPP, David Benjamin (Ed.), 2017, 978-3-03778-525-6, Lars Müller Publ.
- [7] <https://www.fungar.eu/>
- [8] N.J.H. Aversch, G.K. Shunk, C. Kern, *Front. Microbiol., Sec. Extreme Microbiology*, **13**, 2022, DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.877625>
- [9] NASA Innovative Advanced Concepts, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/NIAC_funded_studies.html
- [10] <https://www.bobhendrikx.com/loop>
- [11] <https://neffa.nl/mycotex/>
- [12] <https://boltthreads.com/technology/mylo/>
- [13] <https://www.mycoworks.com/>
- [14] <https://ecovative.com/mycelium-foundry>
- [15] https://www.ansa.it/canale_lifestyle/notizie/food/2021/01/08/lanno-dei-funghi-il-boom-dei-miceli-per-beauty-moda-packaging_9580d0f2-6696-4e17-abc9-e6cacc27c4c4.html
- [16] https://wikitrekk.org/wiki/Propulsione_a_Spore

Living Materials from Bacteria and Fungi

Some bacteria allow the production of self-repairing cementitious materials, while others are able to obtain fully recyclable self-replicating biobricks. Also fungal mycelia can easily colonize various plant products to produce self-healing biobricks that can behave as smart materials to be employed in green buildings. Many other application areas, including fashion and food, are already involved or are planned in the near future.