

DESIGN

RESEARCH & EXPERIMENTATION

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 09 | 2021 | pp. 244-253
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.19229/2464-9309/9242021

MATERIALI RIGENERATIVI BIO-BASED

Una proposta innovativa per il packaging
e i prodotti da costruzione

BIO-BASED CIRCULAR MATERIALS

Innovative packaging and
construction products

Antonella Violano, Monica Cannaviello, Salvatore Del Prete

ABSTRACT

Il Green Deal Europeo e l'European Climate Law del Parlamento Europeo sono il contesto socio-politico nel quale l'industria delle Costruzioni deve impegnarsi per ridurre l'upfront carbon. Questo obiettivo pone in una nuova luce il ruolo dei materiali edili. Concentrandosi sullo sviluppo di soluzioni innovative che riguardano propriamente i materiali biotici e trasformati-biotici, l'approccio Cradle to Cradle premia i biobased materials attribuendo ad essi un ruolo fondamentale nella transizione verso l'economia circolare. Il contributo presenta un materiale innovativo, esito complesso di due differenti progetti di ricerca condotti dal ZEBtwdZEEB Group dell'Università della Campania 'L. Vanvitelli' in collaborazione con la Start-up innovativa Service Biotech Srl, vincitore al BioItaly Investment Forum 2021 & Intesa Sanpaolo Start-Up Initiative per il settore Circular Bioeconomy.

The European Green Deal and the European Climate Law of the European Parliament are the socio-political context in which the construction industry has to engage in order to reduce upfront carbon. This focus puts the role of building materials in a new perspective. By focusing on the development of innovative solutions that specifically address biotic and biobased materials, the Cradle-to-Cradle approach values biobased materials and gives them a key role in the transition to the circular economy. The paper presents an innovative material, the complex outcome of two different research projects conducted by the ZEBtwdZEEB Group of the 'L. Vanvitelli' University of Campania in collaboration with the innovative start-up Service Biotech Srl, winner of the BioItaly Investment Forum 2021 & Intesa Sanpaolo Start-Up Initiative for the Circular Bioeconomy sector.

KEYWORDS

economia circolare, transizione energetica, bioplastica, materiale a base biologica, materiale coltivato

circular economy, energy transition, bioplastics, bio-based material, grown material

Antonella Violano, Architect and PhD, is an Associate Professor of Technology of Architecture at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy) and carries out research in the field of technological innovation for the built environment, with a specific focus on eco-friendly and bio-based materials, on sustainable and energy-efficient technological design. E-mail: antonella.violano@unicampania.it

Monica Cannaviello, Architect and PhD Europeanus, is an Adjunct Professor at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). She carries out research activities mainly in the field of sustainable and energy-efficient technological design. E-mail: monica.cannaviello@unicampania.it

Salvatore Del Prete, Biotechnologist, Managing Director of Service Biotech Srl, carries out research on the morphological study of eukaryotic and prokaryotic cell surface structures and organelles (pathogenic and non-pathogenic) and on the biochemistry of the precorneal film and the structure, morphology and function of microvilli, using SEM/TEM microscopes. E-mail: info@servicebiotech.com

Il Green Deal Europeo (European Commission, 2019) e l'European Climate Law (European Commission, 2020) costituiscono, da un lato, un promettente Piano d'azione per una nuova strategia di crescita economica, climaticamente neutra e socialmente equa e inclusiva (per trasformare le sfide climatiche e ambientali in opportunità¹), e dall'altro, la prima Legge Europea sul clima che ha come obiettivo la 'neutralità climatica' al 2050. In questo contesto socio-politico, nel settore edilizio la decarbonizzazione, che finora si è limitata alla fase operativa attraverso la riduzione del fabbisogno di energia primaria connessa ai diversi usi energetici (riscaldamento, climatizzazione estiva, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria, ecc.), deve inevitabilmente ridurre anche l'energia e il carbonio incorporati (Cannaviello, 2017; Scalisi and Sposito, 2019), con particolare attenzione alla fase iniziale del ciclo di vita e all'upfront carbon (World Green Building Council, 2019; Sposito and Scalisi, 2020). Questo requisito aggiunto pone in una nuova luce la scelta dei materiali da utilizzare. Concentrandosi sullo sviluppo di soluzioni innovative che riguardano propriamente i materiali biotici e trasformati-biotici (materiali a base biologica), l'approccio Cradle to Cradle (McDonough and Braungart, 2002) è fortemente orientato alla qualificazione e differenziazione della materia tracciabile con standard certificabili e premia i materiali a base biologica e i prodotti costituiti principalmente da una o più sostanze derivate da materia vivente (Curran, 2010).

Il contesto di riferimento | La conversione della biomassa in materiale industriale rappresenta una tendenza in aumento. I materiali bio-based, che derivano in tutto o in parte dalla biomassa² (European Commission, 2017), rappresentano una alternativa 'futuristica' alle sostanze chimiche fossili e il modo migliore per transitare verso un'economia a basse emissioni di carbonio (Dahiya et alii, 2020). Per la valutazione del contenuto rinnovabile all'interno di un materiale bio-based si può fare riferimento alla norma ASTM D6866-20³ che calcola il rapporto tra carbonio ottenuto da biomassa (anche detto 'nuovo carbonio') rispetto al contenuto totale di carbonio organico (bio-based carbon / TOC). Per quantificare la percentuale di contenuto bio-based nelle plastiche possono essere utilizzate anche le 5 parti della norma ISO 16620:2015⁴; quest'ultima infatti specifica i principi generali e i metodi di calcolo per determinare la quantità di contenuto bio-based nelle plastiche, contribuendo all'attuazione degli Obiettivi 9 e 12 dell'Agenda 2030 (UN, 2015).

Un materiale bio-based non è necessariamente un materiale biodegradabile e/o compostabile. Per verificarne la compostabilità⁵ si utilizza la norma europea EN 13432:2002⁶ che riguarda in particolare gli imballaggi e che richiede specifici test di biodegradabilità, di compostabilità e di eco-tossicità, i quali, per avere attendibilità, devono essere effettuati da Organismi di certificazione indipendenti⁷. Per valutare la compostabilità di materiali diversi dagli imballaggi, invece, la norma di riferimento è la UNI EN 14995:2007⁸, che specifica i requisiti e le procedure per la determinazione della compostabilità o il trattamento anaerobico dei materiali pla-

stici prevedendo anche un test di disintegrazione in fase di compostaggio. I criteri di valutazione riguardano la biodegradabilità, la disintegrazione durante il trattamento biologico e l'effetto sulla qualità del composto risultante.

La riduzione del fabbisogno di petrolio nella fase di produzione di un materiale bio-based, che viene completamente o in parte sostituito con materie prime da fonte rinnovabile, influisce sicuramente sulla riduzione del carbonio incorporato iniziale, ma non è un criterio di per sé sufficiente per perseguire gli obiettivi globali di decarbonizzazione e di economia circolare in quanto non garantisce la reimmissione finale in un ciclo biologico secondo l'approccio C2C. I benefici ambientali legati all'utilizzo di materiali bio-based sono strettamente connessi anche alle caratteristiche di bio-degradabilità e bio-compostabilità; inoltre, le valutazioni dovrebbero essere sempre fatte in un'ottica di economia circolare, inquadrata rispetto al Ciclo di Vita del prodotto, con particolare attenzione alla fase finale cioè a quella post-consumo. I materiali a base biologica possono dunque giocare un ruolo fondamentale nella transizione verso un'economia circolare, in quanto consentono di innovare radicalmente il processo di produzione-uso-smaltimento intravedendo in nuce, fin dal concept iniziale, una seconda vita per la materia reintroducibile in un nuovo ciclo biologico, grazie alle caratteristiche di bio-compatibilità, bio-degradabilità e processabilità, fondamentali per contribuire alla transizione da un'economia lineare a una circolare (Venkata Mohan et alii, 2016).

Dall'Implementation Action Plan (2020-2025) for the Italian Bioeconomy Strategy Bit II (National Bioeconomy Coordination Board, 2021) si evince l'importante ruolo che la bioeconomia può rappresentare nell'economia circolare attraverso la creazione di catene di valore basate sulla valorizzazione di rifiuti agroalimentari o forestali locali per ottenere biomateriali, opportunità molto speciale per numerose zone rurali, montane e costiere del Paese, sotto il profilo economico e ambientale. Negli ultimi anni, numerosi progressi nella ricerca biologica applicata al campo dei materiali e della loro produzione hanno portato a una maggiore diffusione di materiali basati su cicli di crescita naturali. In un contesto di scarsità di risorse, ciò che rende questi materiali così interessanti è proprio il fatto che in quanto risorse biologiche possono crescere allo stesso ritmo con cui vengono utilizzate. Possono inoltre contribuire a ridurre il carbonio incorporato, in quanto sono materia organica in ricrescita che cattura il carbonio, quindi lo sposta o semplicemente lo trasforma, e alla fine del ciclo di vita dei materiali può tornare alla natura.

In questo contesto, i materiali fungini possono essere considerati un'eccellente alternativa materiale rinnovabile e degradabile con un alto potenziale di innovazione perché hanno il potenziale per sostituire gli attuali materiali a base di petrolio (Cerimi et alii, 2019). Tra i materiali bio-based, le bioplastiche rappresentano uno dei settori più promettenti; tuttavia, ai fini della circolarità del processo non è sufficiente che la plastica sia prodotta con biomasse ma è fondamentale che essa sia anche biodegradabile e compostabile. Solo in questo caso, infatti, sarà possibile allineare il ciclo di vita della plastica con

i cicli naturali. La richiesta di bioplastiche è in costante crescita e, attualmente, il principale settore di utilizzo delle bioplastiche è l'industria degli imballaggi (Dobrucka, 2019). Ma le prospettive di applicazione anche in contesti diversi, compreso quello edilizio, stanno spingendo alla realizzazione di materiali e prodotti sempre più complessi.

Dall'enorme quantità di plastica utilizzata per i prodotti scaturiscono milioni di tonnellate di rifiuti all'anno, solo in parte riciclati o sottoposti a recupero energetico mentre la maggior parte finisce in discarica. Nonostante l'Unione Europea abbia evidenziato un comportamento più virtuoso rispetto agli Stati Uniti⁹ con una riduzione delle quantità collocate in discarica del 44% rispetto al 2006, nel 2018 ha conferito in discarica 7,2 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica (Tab. 1; Fig. 1; Plastics Europe, 2019). È assente invece la percentuale relativa al compostaggio: proprio in questa direzione le bioplastiche compostabili potrebbero rappresentare una soluzione per gestire le criticità relative al consumo di risorse e alla produzione dei rifiuti.

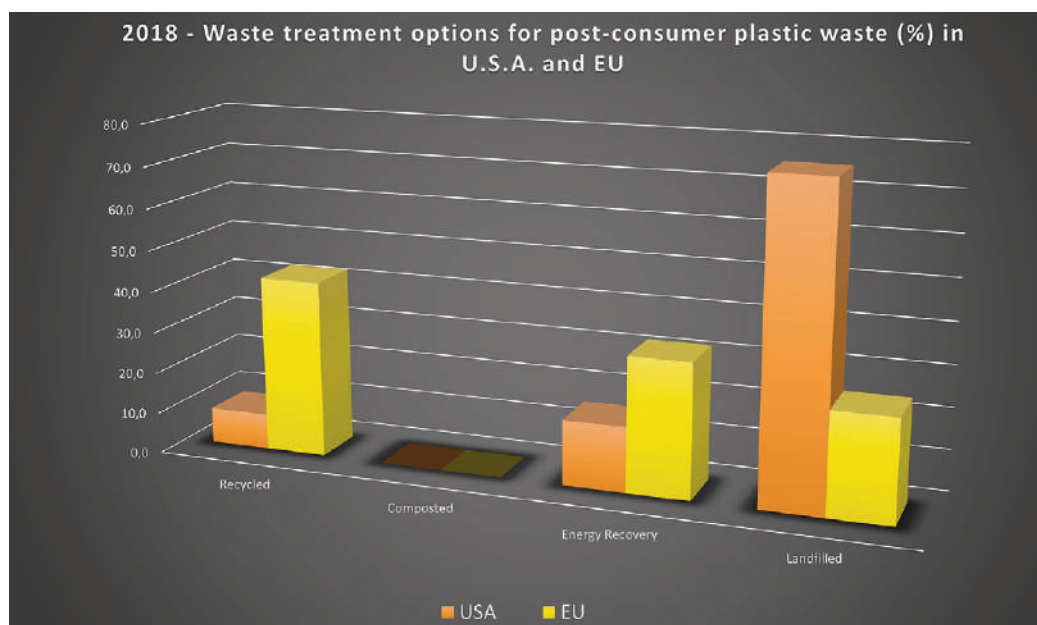
La tecnologia Blockchain può sicuramente contribuire a spingere in questa direzione tutti i settori, e in particolare quello edilizio, rendendo più sicura e controllabile l'origine e le caratteristiche del materiale bio-based, contribuendo così a diffondere una cultura realmente ecosostenibile e comportamenti più virtuosi da parte dei consumatori finali (Netti and Cannaviello, 2018). Tanto premesso, il presente contributo illustra gli esiti di una ricerca nel campo della Circular Bio-economy sui materiali Cradle to Cradle, descrivendo l'approccio metodologico seguito durante le fasi della ricerca, il risultato sperimentale (Mattonella Bioformata a Base Biologica – BBbT) e gli esiti.

Ricerca e Metodo: protasi e apodosi | Il materiale innovativo presentato è l'esito complesso di due differenti progetti di ricerca (Violano, 2018; Violano and Del Prete, 2020) condotti dal ZEBtwdZEEB Group dell'Università della Campania 'L. Vanvitelli', in collaborazione con la startup innovativa Service Biotech Srl. La collaborazione ha avuto inizio nel 2017 con una sperimentazione sui materiali a base biologica (la cui applicazione in campo architettonico è possibile, se non auspicabile, nell'ottica di un approccio Cradle-to-Cradle) colta come opportunità offerta dal progresso tecnologico per convertire il settore delle costruzioni e del Design verso comportamenti orientati alla transizione ecologica ed energetica. L'Università, in quanto detentrica del sapere scientifico, attraverso l'attività di ricerca sperimentale ha concepito l'idea, studiato il materiale dal punto di vista prestazionale e verificato l'applicabilità al settore delle costruzioni (isolanti termici e caseri a perdere per le fondazioni) e del design (packaging); ma la collaborazione virtuosa con la Service Biotech Srl non si è limitata all'uso del microscopio a scansione e dell'EDX per un'analisi specialistica della materia. La sinergia scientifica, realmente integrata, ha permesso di studiare il materiale in base al duplice approccio tecnologico e biotecnologico, mettendo puntualmente in discussione i diversi parametri riscontrati, con una stimolante combinazione di saperi e finalità che hanno reso competitivo il risultato finale.

Management Pathway	USA	EU
Recycled	8,7	42,8
Composted	0,0	0,0
Energy Recovery	15,8	32,4
Landfilled	75,6	24,8
TOTAL	100,0	100,0

Table 1 | Treatment options for plastic waste (%) in the US and EU – Year 2018 (source: epa.gov).

Fig. 1 | Treatment options for plastic waste (%) in the US and EU – Year 2018 (source: epa.gov).



In due successivi momenti di ricerca, impostati sulla stessa matrice metodologica che analizza le prestazioni e definisce i requisiti in base alle osservazioni condotte sulla nanostruttura della materia, sono state sperimentate in forma congiunta le due componenti della Mattonella Bioformata a Base Biologica (BBbT), che è risultata vincitrice per il settore della Circular Bioeconomy al BioItaly Investment Forum 2021 & Intesa Sanpaolo Start-Up Initiative.

La BBbT ha un'anima costituita da un materiale coltivato a temperatura ambiente, composto dal riciclo di scarti della lavorazione silvocolturale (grano, orzo, ecc.) e delle attività agroforestali (macchiatico negativo), e fibro-rinforzato dalle ife di funghi inattivati, il che conferisce al prodotto matericità, compattezza e consistenza; la BBbT ha inoltre un rivestimento in materiale plastico bio-based, la cui miscela di componenti totalmente naturali (amidi vegetali, glicerolo a bassissima concentrazione e agenti battericidi) le conferisce il valore aggiunto di essere completamente compostabile e con un'impronta di carbonio ridotta in completa armonia con la velocità e le scale temporali del ciclo biologico del carbonio (Narayan, 2012). Dal momento che questo materiale è oggetto di brevetto per invenzione industriale da giugno 2020, le note tecniche pubblicabili sono quelle compatibili con lo stato del brevetto. Tuttavia, di seguito si descrivono le fasi di produzione della BBbT (Fig. 2), riassumibili in due cicli paralleli che convergono in un'ultima fase finale nella quale vengono conferite al prodotto le caratteristiche richieste dall'utente utilizzatore.

La produzione dell'anima della mattonella è strutturata nelle seguenti fasi: Fase 1) Trinciatura 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; Fase 3) Sterilizzazione con vapore, per eliminare gli antagonisti dei miceli; Fase 4) Inoculazione del micelio; Fase 5) Coltivazione del materiale (Figg 3-5); Fase 6) Inattivazione dei miceli con tre cicli di autoclavaggio. Il rivestimento in Bioplastica richiede quattro fasi di lavorazione: Fa-

se a) composizione della miscela in fase liquida; Fase b) composizione della miscela in fase solida; Fase c) colatura sulla mattonella bioformata; Fase finale della produzione (solidificazione attraverso due cicli termici – aumento della temperatura a umidità relativa costante – e analisi delle prestazioni fisiche mediante stress-test con durometro).

Tutto il processo di produzione è fortemente determinato da una fase preliminare di progetto che mette in relazione le esigenze manifestate dal cliente in fase di ordine del prodotto e la tipologia di miscela realizzata per soddisfare tali esigenze. Nel periodo di sperimentazione, infatti, ci si è resi conto che la variazione di tipologia di amidi e additivi naturali utilizzati determinava prestazioni finali differenti (Violano and Del Prete, 2020), diversamente utili in base all'uso finale a cui il materiale era destinato – packaging piuttosto che materiale per l'edilizia (Fig. 6). Queste variazioni costituiscono una conoscenza fondamentale per la vera innovazione del prodotto. La sperimentazione sulla bioplastica ha portato a testare diversi dosaggi di miscela solida, variando le percentuali di amido e di cloruro di sodio. Infatti, durante la sperimentazione si è riscontrato che concentrazioni differenti di cloruro di sodio estrudono totalmente il mix bioplastica oppure si inseriscono nella trama interrompendola, il che ha portato a individuare nel 2% la quantità di sale che si riesce a solubilizzare bene con il mix bioplastica e a non creare alterazione della struttura, per estrusione (Figg. 7-12). Tuttavia, in altri contesti, in relazione a mutate necessità, al fine di ottenere un prodotto finale diversamente performante, la percentuale di cloruro di sodio potrebbe variare.

Il valore dell'innovazione risiede, quindi, nella conoscenza delle dinamiche del fenomeno biotico (Fig. 13) che si innesca naturalmente al determinarsi delle corrette condizioni ambientali (prevalentemente temperatura tra i 28 °C e 32 °C e umidità relativa tra il 60-70%) e che viene utilizzato a fini produttivi, fino a trasformarsi in materiale da costruzione o per il packaging. L'idea può anche non essere tecnologicamente avanzata, come ad esempio quella alla base

del materiale coltivato che struttura il cuore della BBbT, ma le sue caratteristiche fisiche e tecniche occupano uno spazio di mercato significativo per il settore delle costruzioni e del Design in piena transizione ecologica.

L'analisi di eco-compatibilità permette di ridurre al minimo per questo materiale l'impronta di carbonio e l'energia incorporata nonché di definire chiaramente la sua capacità di carico ambientale, definibile come la capacità di assorbire e controllare i fenomeni di trasformazione ambientale con un impatto sostenibile per l'ecosistema. Rispetto agli studi scientifici condotti in questo campo, il materiale bioformato è fortemente tarato sull'approccio del 'total low': bassi costi di realizzazione, bassi impatti ambientali (in accordo con le linee guida europee per la salvaguardia della salute e dell'ambiente) e minima produzione di rifiuti ed emissioni di CO₂; in tal modo si intende superare la soglia di competitività, restituendo un prodotto che sia non solo eco-sostenibile ma anche economicamente conveniente, sia per il produttore sia per l'utente finale. Un nuovo modo di pensare all'innovazione di prodotto, meno impattante dal punto di vista ecologico e reintroducibile a fine vita utile nel ciclo biologico secondo l'approccio Cradle to Cradle.

Innovazione e sperimentazione: un materiale più che un prodotto

L'osservazione della macrostruttura in microscopia a scansione ha permesso una comprensione approfondita delle caratteristiche fisiche, biologiche, tecniche e strutturali espresse da questi materiali, consentendo la rimodulazione delle condizioni ambientali a contorno per la crescita del campione (nel caso del materiale coltivato bio-based derivato da funghi) e una variazione della composizione percentuale del materiale (nel caso dei materiali plastici bio-based) in relazione alle specifiche tecniche richieste dal cliente-committente. Questa variabilità della composizione definisce il valore aggiunto dell'innovazione: un nuovo modo di pensare al materiale in relazione alle esigenze che possono essere variabili in relazione all'utente e alla funzione che il prodotto deve svolgere.

L'analisi materica dei componenti sperimentali e innovativi attraverso la microscopia a scansione ha, infatti, permesso di valutare a livello microtecnologico le dinamiche biologiche evolutive che sono alla base della sperimentazione, nonché la struttura (lamellare o trabecolata) che determina le caratteristiche tecniche di elasticità, porosità e flessibilità richieste in misura variabile in relazione alla funzione che il materiale deve svolgere una volta bioformato. In questo modo, il materiale può trovare applicazione in diversi ambiti, tra cui quello del packaging per prodotti agroalimentari garantendo il mantenimento delle condizioni necessarie per un prodotto di qualità (Federici et alii, 2009).

La ricerca introduce un nuovo modo di interpretare criticamente il ruolo dei materiali nel processo di produzione sia del settore delle costruzioni sia del Design, dando rilievo non soltanto al fattore prestazionale durante la vita utile del prodotto, enfatizzato dal complesso sistema di norme cogenti alle quali bisogna attenersi, ma anche all'impronta ambientale che deriva dall'uso, anche e soprattutto al di là della sua vita utile. L'innovazione si riferisce principalmente alla preparazione di una piastrina bioformata da materiale di scarto agricolo come orzo, macchiatico negativo, materiale di scarto da potatura della vite, materie plastiche biodegradabili a impatto zero. Ciò coerentemente con la Strategia Europea per la plastica in un'economia circolare che promuove «Un'industria della plastica intelligente, innovativa e sostenibile, in cui la progettazione e la produzione rispettino pienamente le esigenze di riutilizzo, riparazione e riciclaggio, genera crescita e occupazione in Europa e contribuisce a ridurre le emissioni di gas a effetto serra dell'UE e la sua dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili» (European Commission, 2018, p. 5).

Altro carattere di innovazione del prodotto è legato al fatto che, ad oggi, la maggior parte degli scarti vegetali sono sottoposti a incenerimento o utilizzati come compost naturale e hanno scarso valore commerciale come materiale da reintrodurre in un ciclo produttivo. Per la sperimentazione in corso, la materia prima utilizzata è proveniente dai prodotti del sottobosco del Monte Cervati e da quelli di scarto delle attività agricole presenti nel Comune di Piaggine (SA) con il quale il Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell'Università della Campania 'Luigi Vanvitelli' ha firmato nel 2020 un Accordo di Programma per la valorizzazione delle risorse ambientali. Il suddetto territorio si identifica quindi come filiera dedicata per l'approvvigionamento delle materie prime e, attraverso la realizzazione di un programma d'investimento, si intende sviluppare un prototipo di industria rigenerativa di rifiuti di scarti vegetali associati a bioplastiche compostabili.

Come è noto, ridurre le quantità di imballaggi in plastica è importante per diversi motivi: da un lato, essi sono prodotti usa e getta che aumentano il volume di plastica da smaltire e riciclare, dall'altro, impiegano più di 100 anni per degradarsi (Plastics Europe, 2019) in microparticelle (micropastiche) che possono danneggiare sia la salute delle acque marine sia quella umana. Di fronte a questa emergenza, i ricercatori indagano sempre più soluzioni di imballaggio biodegradabili per sostituire la plastica, prodotti da

fonti rinnovabili, concepiti come imballaggi compostabili. La domanda del mercato, fortemente orientata verso l'ecosostenibilità degli imballaggi, sta influenzando sia le aziende produttrici sia soprattutto quelle distributrici di prodotti agroalimentari che sono quindi interessate agli imballaggi biodegradabili ed ecosostenibili.

Una recente ricerca Nielsen presentata nel 2020 (Manuelli, 2020) afferma che le vendite in Italia di prodotti vicini ai valori della sostenibilità crescono più della media del mercato (+ 3,4% sull'anno precedente): quello che emerge dalla ricerca è che la sostenibilità del packaging paga al pari di qualità e sicurezza e che il settore alimentare italiano sta cercando una strada in linea con i nuovi paradigmi dettati dall'economia circolare anche nel packaging. A tal proposito, Assobioplastiche ha evidenziato come la quantità di imballaggi compostabili prodotti in Italia sia aumentata di oltre il 150% in soli sette anni, passando da 39.250 tonnellate nel 2012 a 101.000 tonnellate nel 2019 (Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile and FISE UNICIRCULAR, 2020). Secondo la fotografia scattata dall'Osservatorio Grandi Consumi Packaging di Nomisma in collaborazione con Sin Life¹⁰, sebbene quasi il 60% dei prodotti non abbia attualmente alcun riferimento alla riciclabilità degli imballaggi, la sostenibilità nei prodotti confezionati vale 6,5 miliardi di euro mentre il rispetto dell'ambiente è già un criterio di acquisto importante per il 36% degli italiani. Sembra quindi inevitabile che il settore veda sempre più materiali di origine vegetale, provenienti da filiere certificate tracciabili e completamente riciclabili.

Il principale concorrente della BBbT è Ecovative, dal quale ha preso spunto la prima parte del progetto di ricerca iniziato nel 2017, tuttavia, le caratteristiche della BBbT, in relazione ai prodotti della stessa categoria presenti sul mercato, la rendono competitiva (Tab. 2). Il punto di forza di Ecovative riguarda principalmente le dimensioni e la capacità produttiva, che gli consentirebbero di introdurre la soluzione sul mercato globale in minor tempo rispetto alle piccole aziende, mentre il suo punto debole è nello sviluppo della soluzione limitata all'uso della canapa. Ne consegue, quindi, che attualmente

in Italia e in Europa c'è una grande fetta di domanda di mercato da soddisfare.

Conclusioni | La modalità di selezione dei materiali da costruzione e per il Design si evolve, quindi, verso l'uso di indicatori in grado di apprezzare gli impatti della 'seconda vita' di componenti che, svolte le richieste funzioni, tornano all'ecosistema naturale sotto forma di compost/nutrienti. Da un lato, si amplia, quindi, la visione scientifica che invita a indagare su caratteristiche di compostabilità e totale biodegradabilità in condizioni a contorno standard, dall'altro, il settore industriale deve introitare e capitalizzare (monetariamente) i benefici ambientali riconoscibili per il momento come 'valore aggiunto', puntando sull'innovazione di prodotto fondata sull'innovazione della conoscenza scientifica. Ciò, per l'imprenditore, vuol dire vestire i panni del mecenate illuminato, scommettere sulla visione che il mondo della ricerca riconosce come tutt'altro che utopica e puntare su un futuro di transizione che ormai è alle porte.

Questo è stato, in sintesi, l'obiettivo della ricerca: rispetto alle dinamiche dell'economia circolare, creare catene di valore della Bioeconomia circolare basate sulla valorizzazione dei rifiuti da colture dedicate non alimentari – come i tagli dei boschi da legna (macchiatico negativo) o il riciclo degli scarti della lavorazione ad alta intensità biologica – estendendo il loro ciclo di vita e tenendo conto del loro potenziale di stoccaggio del carbonio. È un notevole punto di forza che incentiva anche gli Enti locali a promuovere iniziative industriali che operano in questa direzione: l'innovazione che risiede nella definizione del materiale 'on demand' in base alle caratteristiche fisiche e tecniche necessarie è il maggiore punto di forza del progetto, sia sul piano teorico che applicativo e contemporaneamente il suo limite intrinseco. Gli sviluppi futuri di questa attività di ricerca vedono la creazione di uno spin off accademico che fornisca alle imprese che intendono investire in ricerca e innovazione, ma non hanno al loro interno professionalità adeguate, l'expertise necessario per definire dosaggi e procedure che sono difficilmente standardizzabili. L'innovazione di prodotto alla quale si è arri-

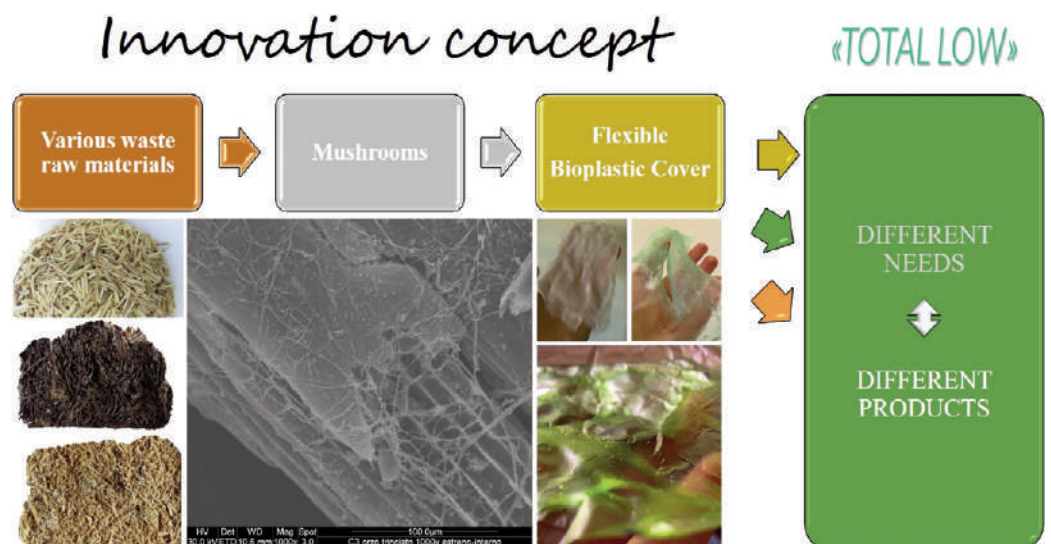
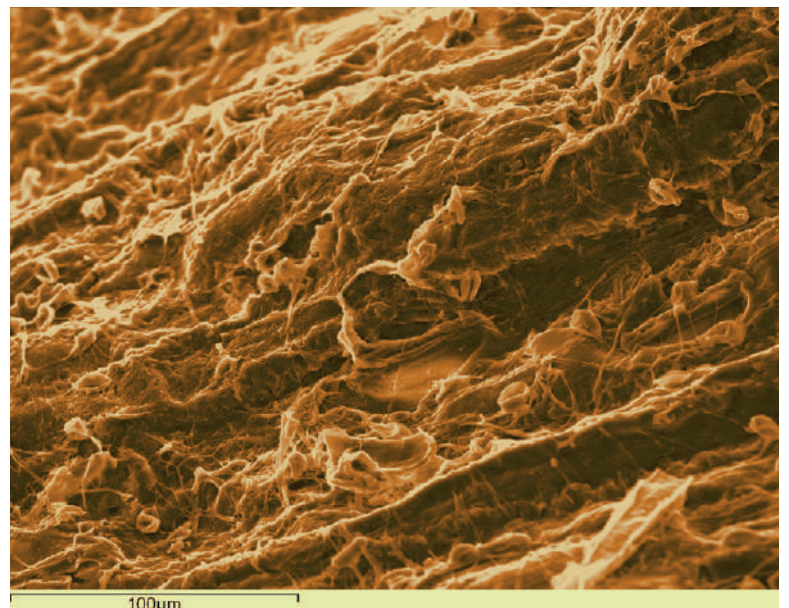
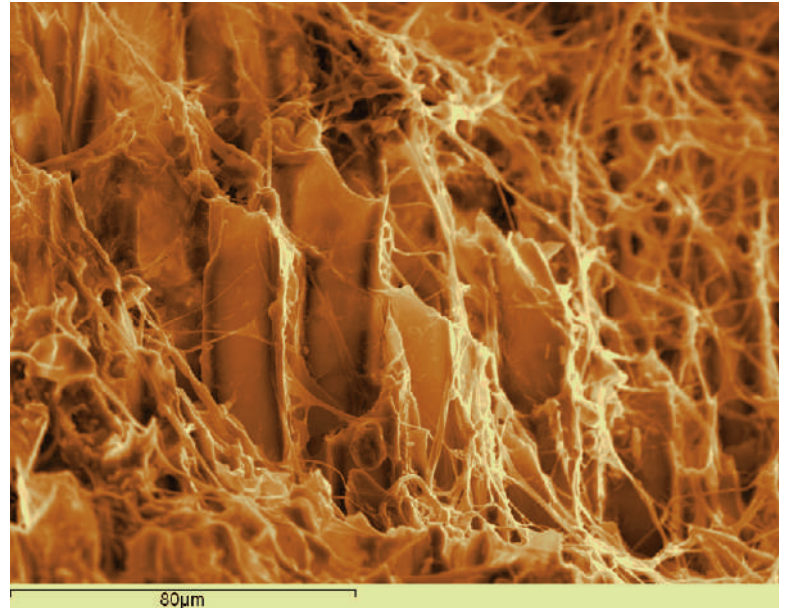
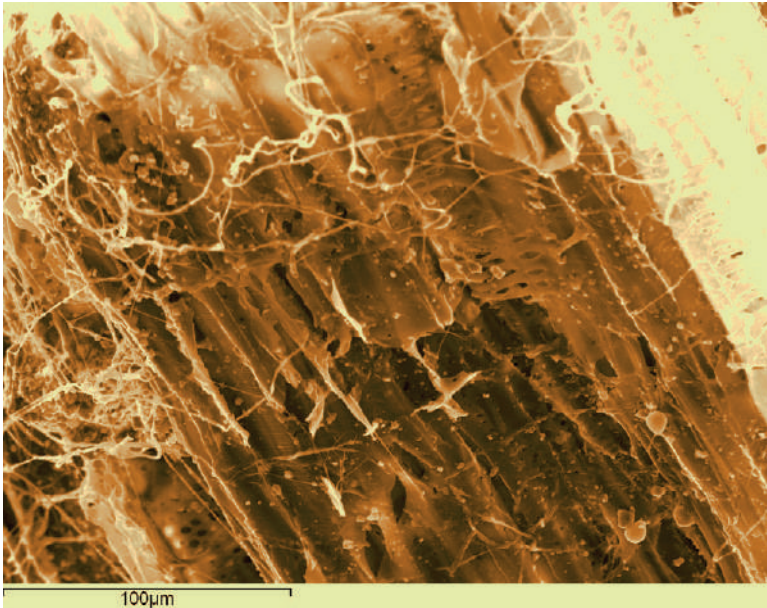


Fig. 2 | The BBbT production steps (credit: A. Violano and S. Del Prete, 2020).



Figg. 3-5 | Phase 5 – Growing material: Section colonised with ligneous trabeculae; Section colonised by funghi; Section with longitudinal ligneous trabeculae (credits: A. Violano and S. Del Prete, 2020).

vati con questa ricerca ha intrinsecamente conaturata un'innovazione di processo che impone un'attività di ricerca continua che, caso per caso, progetti il componente con le migliori prestazioni.

Il potenziale insito in questo materiale, con proprietà di isolamento termico e acustico in grado di contribuire in linea con i Piani dell'UE alla riduzione della quota di plastica a livello globale, le diverse applicazioni in semiprodotto e prodotti finali nonché l'uso di macchinari tradizionali senza la necessità di grandi investimenti di capitale per rinnovare la produzione, lo rendono competitivo e un potenziale partner per la tecnologia di diverse realtà industriali (es. Mogu – radical by nature). Dal punto di vista della circolarità, il Rapporto sull'Economia Circolare in Italia del 2021 (Circular Economy Network, 2021) ci mette di fronte a una brutale realtà: di fronte all'economia circolare siamo tutti Paesi in via di sviluppo.

The European New Green Deal (European Commission, 2019) and the European Climate Law (European Commission, 2020) are, on a hand,

a promising Action Plan for a new strategy of economic growth, climate-neutral and socially fair and inclusive (to change climatic and environmental challenges into opportunities¹) and, on the other hand, the first European Law on climate aiming at 'climatic neutrality' by 2050. In such a socio-political context, decarbonisation in the construction sector, which has been so far limited to the operational phase through reducing primary energy need, linked to several energy uses (heating, cooling, ventilation, sanitary hot water production, etc.), must also reduce energy and embodied carbon inevitably (Cannaviello, 2017; Scalisi and Sposito, 2019), paying particular attention to the initial phase of the lifecycle and upfront carbon (World Green Building Council, 2019; Sposito and Scalisi, 2020). This added requisite put the choice of the material to be used in a new light. Focusing on the development of innovative solutions concerning properly biotic and transformed-biotic materials (bio-based materials), the Cradle-to-Cradle approach (McDonough and Braungart, 2002) is strongly orientated to the qualification and differentiation of the materials that can be traced thanks to

certified standards and it rewards bio-based materials and products made up mainly of one or more substances coming from living materials (Curran, 2010).

The background | The conversion of biomass into industrial material represents an increasing trend. Bio-based materials, coming partly or completely from biomass² (European Commission, 2017), represent a 'futuristic' alternative to fossil fuels and the best way to transit towards an economy with low carbon emissions (Dahiya et alii, 2020). You can refer to the ASTM D6866-20³ standard to evaluate the renewable content within a bio-based material, which computes the ratio between the carbon obtained from biomass (called 'new carbon', too) in comparison with the total quantity of organic carbon (bio-based carbon/TOC). The five parts of the ISO 16620:2015⁴ standard can be used to determine the percentage of bio-based content in plastics, too; this standard, in fact, specifies the general principles and the computing methods to determine the quantity of bio-based content in plastics, contributing to the implementation of Goal 9 and 12

for Sustainable Development of the 2030 Agenda (UN, 2015).

A bio-based material is not necessarily a biodegradable and/or compostable material. To check its compostability⁵ EN 13432:2002⁶ European Standard is used, particularly concerning the packaging and which requires specific biodegradable compostability and eco-toxicity tests, that must be carried out by independent certification Bodies to be reliable⁷. The reference standard to evaluate the compostability of different materials from packaging is, instead, UN EN 14995:2007⁸, which specifies the requisites and procedures to determine either compostability or anaerobic treatment of plastic materials with a disintegration test in the composting phase. The evaluation criteria are related to biodegradability, disintegration during the biological treatment and the effect on quality of the resulting composite.

The reduction of petrol needs during the production phase of a bio-based material, partly or completely substituted with raw materials from renewable sources, certainly impacts on the reduction of the initial embodied carbon, but it is not a sufficient criterion itself, to reach the global goals of decarbonisation and circular economy, as it does not assure the final re-immission in a biocycle according to the C2C approach. The environmental benefits linked with the use of bio-based materials are strongly linked with the biodegradability and bio-compostability characteristics, too; moreover, evaluations should be always made in a circular economy viewpoint, in the respect to the Lifecycle of a product, paying particular attention to the final phase, that is the post-consumption one. So, the bio-based materials can play an essential role in the transition towards a circular economy, as they allow radically to innovate the production-use-waste process, glimpsing in nuce, since the initial concept, a second life for the material that can be reintroduced in a new biocycle, thanks to its characteristics of biocompatibility, biodegradability and processability, which are essential for contributing to the transition from a linear to a circular economy (Venkata Mohan et alii, 2016).

Bioeconomy plays an important role in the circular economy, as it can be underlined from the Implementation Action Plan (2020-2025) for the Italian Bioeconomy Strategy Bit II (National Bioeconomy Coordination Board, 2021). It is a very special opportunity for several rural, mountain and coastal areas of our country, from an economical and environmental point of view thanks to the creation of value chains based on valorisation of local agri-food and forestry wastes to obtain biomaterials. In recent years, several progresses in bioresearch applied to the field of materials and their production have led to a higher spread of materials based on natural growth cycle. In a context with resources scarcity, these materials are so interesting because bioreources can increase as fast as they are used. Moreover, they can contribute to reducing the embodied carbon, as they are growing organic materials that capture carbon, they shift it or simply transform it, and they can come back to nature at the end of their material lifecycle.

In such a context, fungal materials can be considered as an excellent alternative to renewable and degradable materials with a high potential-

ity of innovation because they have the possibility to substitute the current petrol-based materials (Cerimi et alii, 2019). Bioplastics, among bio-based materials, represent one of the most promising sectors, but it is not sufficient that plastic is produced with biomass to give circularity to the process; it is essential that it is biodegradable and compostable, too. Only in this case, in fact, the plastic lifecycle will be aligned to the natural cycles. The demand for bioplastics is constantly increasing and currently the main sector using bioplastics is the packaging industry (Dobrucka, 2019). The perspectives of application also in other contexts, including the construction one, are leading to carry out more and more complex materials and products.

Millions of tons of wastes per year derive from the huge quantity of plastic used for the products, only partially recycled or energy recovered, while most of it are placed in landfill sites. Despite the European Union showed a more virtuous behaviour than the U.S.A.⁹ with a 44% reduction of the quantities placed in landfill sites in comparison with 2006, it placed 7,2 million tons of plastic wastes in landfill sites in 2018 (Tab. 1; Fig. 1; Plastics Europe, 2019). There is no percentage concerning with composting: compostable bioplastics may represent a solution in such a direction to manage criticalities related to the resource consumption and waste production.

Blockchain technology can surely contribute to lead all sectors, and particularly the construction one, in such a direction, making it safer and possible to control the origin and characteristics of the bio-based material so really diffusing an eco-sustainable culture and more virtuous behaviours from the final consumers (Netti and Cannaviello, 2018). Based on these premises, this contribution shows both the results of a research in the field of Circular Bioeconomy about Cradle-to-Cradle materials, describing the methodological approach followed during the research phases, and the experimental result (Bio-Based Bio-formed Tile – BBbT) and the other results.

Research and Methodology: protasis and apodoses

The innovative material shown is the complex result of two different research designs (Violano, 2018; Violano and Del Prete, 2020) made by the ZEBtdwZEEB Group of 'L. Vanvitelli' University of Campania, in collaboration with the innovative Service Biotech Srl start-up. The collaboration between the University and the start-up started in 2017 with an experimentation on bio-based materials (whose application in the architectural sector is possible, and even desirable, in the viewpoint of a Cradle-to-Cradle approach), seen as an opportunity offered by the technological progress to convert the construction and Design sector towards behaviours orientated to the ecological and energy transition. The University holding the scientific knowledge, through the activity of experimental research, has conceived the idea, studied the material from a performing point of view and tested its appliance to both the construction (thermal insulations and disposable formworks for its foundations) and design sector (packaging), but the virtuous collaboration with the Service Biotech Srl is not only limited to the use of the scanning electron microscope (SEM) and the energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) for a specialistic analysis of the material. The scientific synergy, really integrated, has allowed studying the material on the base of the dual technological and biotechnological approach, debating on all the different parameters found, with a stimulating combination of knowledge and goals that has made the final result competitive.

In two following moments of research, implemented on the same methodology, that analyses the performances and defines the requisites according to the observations made on the nanostructure of the material, the two components of the Bio-Based Bio-formed Tile (BBbT) have been experimented together and it was the winner for the sector of the Circular Bioeconomy at the BioInItaly Investment Forum 2021 & Intesa Sanpaolo Start-Up Initiative.

The BBbT has got its inner part made up of

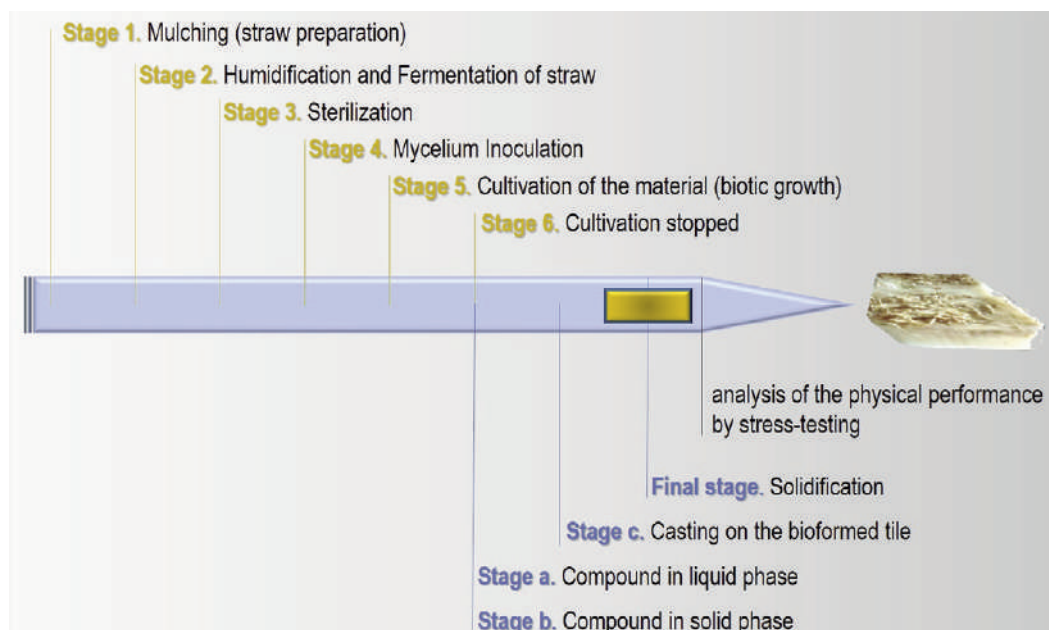
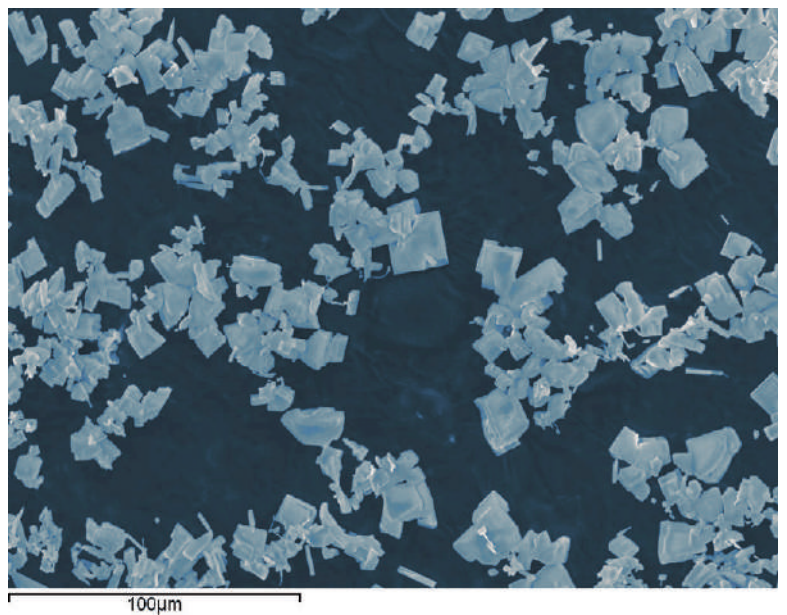
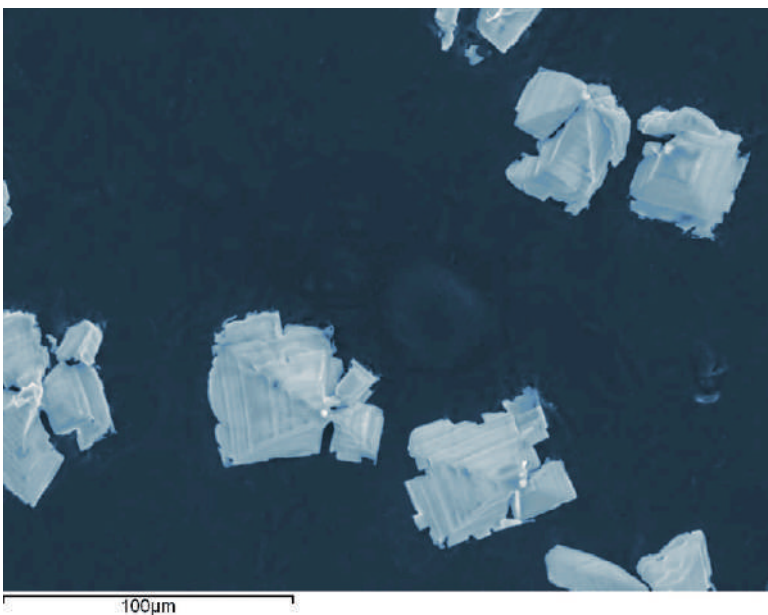
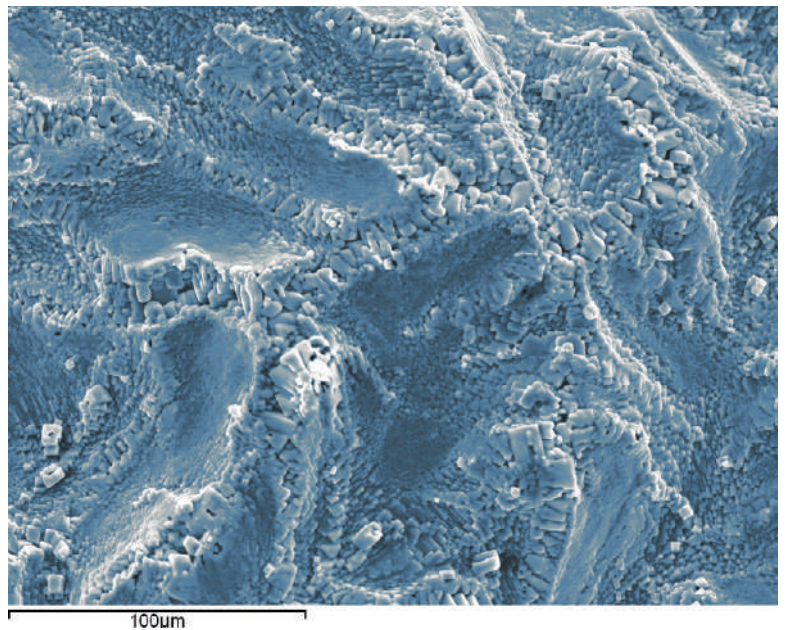
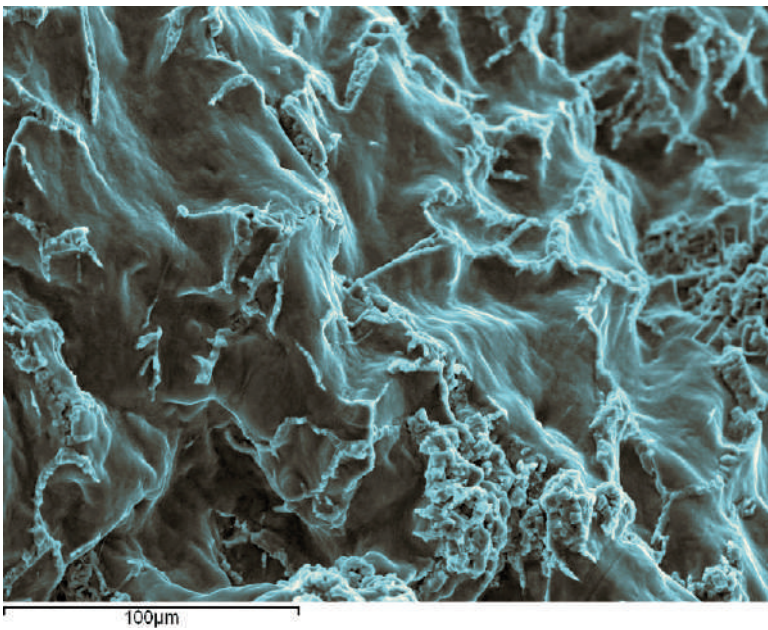
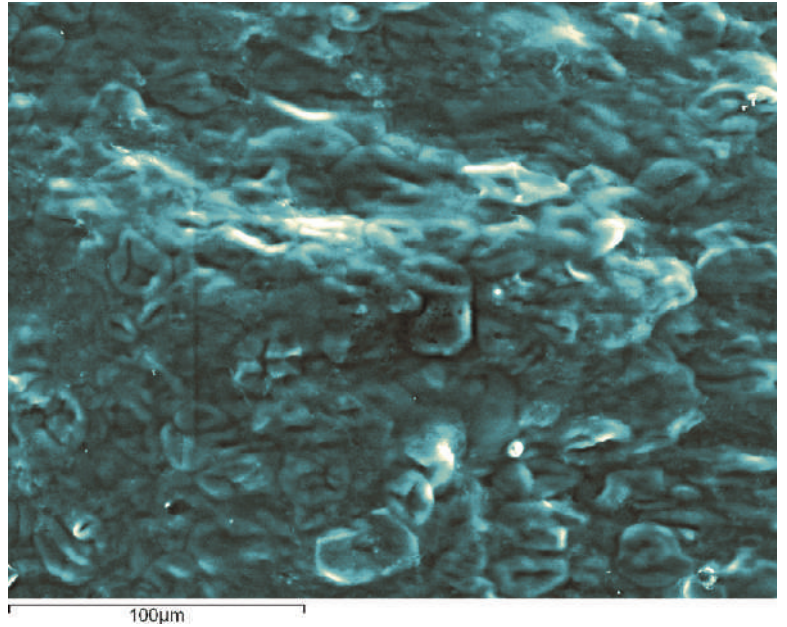
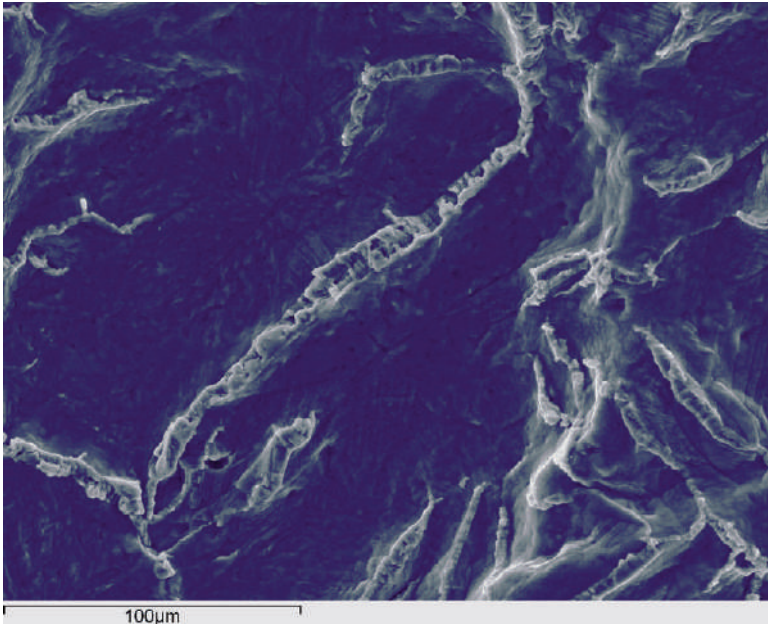


Fig. 6 | BBbT: innovation in the concept (credit: A. Violano and S. Del Prete, 2020).



Figg. 7-12 | Bioplastics with 20% NaCl; Bioplastics with 2% NaCl; Bioplastics with 30% NaCl; Bioplastics with 40% NaCl; Bioplastics with 50% NaCl; Bioplastics with 60% NaCl (credits: A. Violano and S. Del Prete, 2020).

a material cultivated at a room temperature, with the recycle of the waste from forestry-cultivation processing (wheat, barley) and agroforestry activities (negative forestry waste), and fibre-reinforced by inactivated hyphae of fungi, that gives the product its materiality, compactness and consistency; the BBbT, moreover, has got a bioplastic film, whose mix of completely natural components (vegetable starches, very low concentration of glycerol and bactericide agents) gives it an added value to be completely compostable and have a reduced carbon footprint in a full harmony with the speed and temporal scales of the carbon biocycle (Narayan, 2012). As this material has been object of license for industrial invention since June 2020, the technical notes to be published are those ones compatible with the state of the license. Despite this, the production phases of the BBbT (Fig. 2) are described as follows and can be summed up into two parallel cycles convergent in the last phase, when the characteristics required by the user are given to the product.

The production of the inner part of the tile is structured in the following phases: Phase 1) Shredding for the preparation of straws; Phase 2) Humidification and fermentation of the straws, periodically wetted with water spray and fermented in a closed place for seven days; Phase 3) Sterilisation by vapour to eliminate the mycelium antagonists; Phase 4); Inoculation of the mycelium; Phase 5); Growing material (Figg. 3-5); Phase 6): Inactivation of the mycelium through three autoclaving cycles. The Bioplastic film asks for four working phases: Phase a) composition of the mix in a liquid phase; Phase b): composition of the mix in a solid phase; Phase c) pouring on the bio-formed tile; final Phase of the production (solidification through two thermal cycles – temperature increase to constant relative humidity – and analyses of the physical performances through stress-test with durometer).

The whole production process is strongly determined by a preliminary planning phase that links the customer's needs during the product ordering phase to the typology of the mix carried out to satisfy his/her own needs. In the experimentation phase, in fact, they realise that varying the typology of starches and natural additives used, give different final performances (Violano and Del Prete, 2020), differently useful according to – packaging rather than building materials (Fig. 6). These variations are an essential knowledge for the real innovation of the product. The experimentation on bioplastic has led to test different dosages of solid mix, varying the percentage of starch and sodium chloride. During the experimentation, in fact, they found that either different concentrations of sodium chloride totally extrude the bioplastic mix, or they fit into the pattern interrupting it; this has led to individualise that 2% is the quantity of salt that can be solubilised well with the bioplastic mix, without creating alterations to the structure, for extrusion (Figg. 7-12). Anyway, the percentage of sodium chloride could vary in other contexts, according to changed needs, to obtain a final product differently performant.

The innovation value is in the knowledge of the biotic phenomenon dynamics (Fig. 13) that

is naturally started when the right environmental conditions take place (mainly temperature between 28 °C and 32 °C and relative humidity between 60-70%) and that is used with production aims, up to be transformed into building or packaging material. The idea can even be not technologically advanced, as for example that one at the base of the cultivated material, which structure the core of the BBbT, but its physical and technical features have a meaningful place on the market for the construction and Design sector in a full ecological transition.

The analysis of eco-compatibility allows to reduce the carbon footprint and the embodied energy for this material at the minimum level, as well as to clearly define its capacity of environmental load, which can be defined as the capability to absorb and control the phenomena of environmental transformation with a sustainable impact on the ecosystem. In comparison with the scientific studies conducted in this sector, the bio-formed material is strongly based on the 'total low' approach: low costs of production, low environmental impacts (according to the European Environmental, Health and Safety Guidelines) and minimum production of wastes and CO₂ emission; so they intend to overcome the threshold of competitiveness, offering a product that is not only eco-sustainable but also economically convenient, for both the producer and the ending user. A new way of thinking about the innovation of a product, less impacting from an ecological point of view and that can be reintroduced at the end of its bio-lifecycle according to the Cradle-to-Cradle approach.

Innovation and experimentation: a material more than a product

| The observation of the macrostructure through scanning microscopy has allowed a close comprehension of the physical, biological, technical and structural features shown by these materials, favouring to shape again the environmental conditions surrounding the sample growth (in the case of bio-based cultivated material coming from fungi) and a variation of the percentage composition of the material (in the case of bioplastic materials), in relationship with the specific techniques required by the customer. This variability of the composition defines the added value of the innovation: a new way of thinking about the material in relationship with the needs that can be variable dependently on the customer and the function the product must have.

The material analysis of the experimental and innovative components through the scanning microscopy has, in fact, allowed evaluating the evolutive biological dynamics at a microtechnological level, which are at the base of the experimentation, as well as the (lamellar or trabecular) structure that determines the technical characteristics of elasticity, porosity and flexibility required in a variable measure, in relationship with the function that the material must have once it is bio-formed. Thus, the material can be applied to several sectors, among which packaging for agri-food products, guaranteeing the maintenance of the conditions necessary for a qualitative product (Federici et alii, 2009).

The research introduces a new way to interpret critically the material role in the production process of both the construction and Design sec-

tor, giving importance not only to the performing factor during the product useful lifecycle, stressed by the complex system of mandatory standards that must be respected, but to the environmental footprint deriving from its use, also and above all beyond its useful life. The innovation refers mainly to the preparation of a bio-formed tile from grown wastes like barley, negative forestry waste, waste from pruning the vine and zero impact biodegradable plastic materials. This is coherent with the European Strategy for plastic in a circular economy promoting «A smart, innovative and sustainable plastics industry, where design and production fully respect the needs of reuse, repair, and recycling, brings growth and jobs to Europe and helps cut EU's greenhouse gas emissions and dependence on imported fossil fuels» (European Commission, 2018, p. 5).

Another innovating aspect of the product is linked with the fact that up to now most of the vegetable wastes are either incinerated or used as a natural compost and have scarce commercial value as a material to be reintroduced in a productive cycle. For the experimentation in progress, the raw material used comes from both products of the Mount Cervati underwood and wastes of the cultivation activities in the Commune of Piggine (SA), with which the Department of Architecture and Industrial Design (DADI) of 'L. Vanvitelli' University of Campania signed an Agreement of Programme in 2020 for the valorisation of the environmental resources. The above-mentioned territory is, therefore, considered as a dedicated supply chain for raw materials and through carrying out an investment programme, it tends to develop a prototype of regenerative industry of vegetable wastes, associated with compostable bioplastics.

As it is well-known, reducing the quantity of plastic packaging is important for different reasons: on one hand, they are disposable products that increase the plastic volume to be disposed and recycled, on the other hand, it takes to them more than 100 years to be disposed of (Plastics Europe, 2019) in microparticles (microplastics) that can harm both the health of seawaters and man's health. Before such an emergency, researchers try to find more and more solutions of biodegradable packaging to substitute plastic, produced from renewable sources, conceived as compostable packaging. The market demand, strongly oriented towards the eco-sustainability of packaging, is influencing both the manufacturing companies and above all the distribution companies of agri-food products, that are, therefore, interested in biodegradable and eco-sustainable packaging.

A recent Nielsen research introduced in 2020 (Manuelli, 2020) states that the sales in Italy of products near the sustainable values increase more than the market average (+ 3,4% in comparison with the previous year). What emerges from the research is that the sustainability of packaging pays the same as quality and safety and that the Italian food sector is looking for a way in line with the new paradigms dictated by circular economy, even for packaging. So, Assobioplastiche has underlined how the quantity of compostable packaging produced in Italy has been increased by over 150% just in seven years, passing from 39.250 tons in 2012 to 101.000 tons in

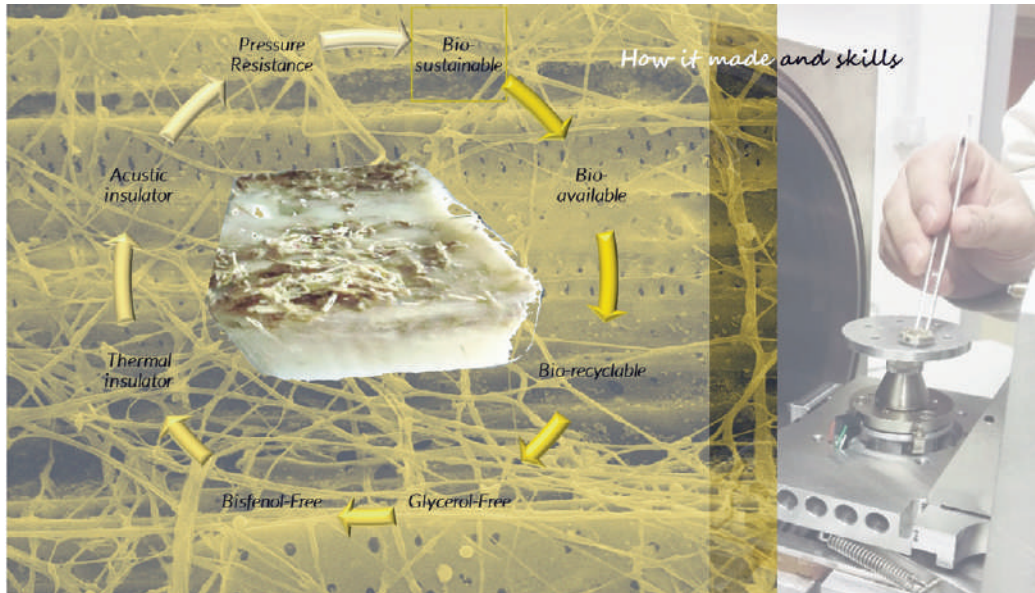


Fig. 13 | BBbT: understanding the biotic phenomenon (credit: A. Violano and S. Del Prete, 2020).

Characteristics	Ecovative	Biodegradable plastic: PLA	BBbT
Low energy	/	/	X
Biocompostable	X	/	X
Cradle to cradle	X	/	X
Environmental impact	X	/	X
Multi-use	X	X	X
Low cost	/	X	X
Low recycling costs	/	/	X

Table 2 | BBbT: the characteristics that distinguish it in the market (credit: A. Violano and S. Del Prete, 2020).

2019 (Foundation for the Sustainable Development and FISE UNICIRCULAR, 2020). According to the picture taken by the Large Consumption Packaging Observatory by Nomisma in collaboration with Sin Life¹⁰, despite nearly 60% of the products has currently no reference to the recyclability of the packaging, the sustainability in packaged products is worth 6,5 million euros while being environmental-friendly is already an important criterion of purchasing for 36% of Italians. So, it seems inevitable that the sector takes into consideration more and more materials of vegetable origin, coming from certified supply chains, to be traced and completely recyclable.

The main competitor of the BBbT is Ecovative, from which the first part of the research project started in 2017 has taken some ideas. Anyway, the BBbT characteristics, if compared with the products of the same category on the market, make it competitive (Tab. 2). The strength of Ecovative mainly concerns its sizes and its productive capacity, which allow it to introduce its solution on the global market in less time than the small-sized companies, while its weakness is in the development of the solution limited to the use of hemp. As a result, currently, there is a large amount of demand on the market to be satisfied in Italy and Europe.

Conclusions | How the building and Design materials are selected is evolving towards the use

of indicators able to appreciate the impacts of the 'second life' of components that, once made the functions required, come back to the natural ecosystem as composts / nutrients. On one hand, the scientific vision is enlarged, which tends to investigate the compostability and total biodegradability characteristics in standard surrounding conditions; on the other hand, the industrial sector must take and capitalise (monetarily) the environmental benefits that can be recognised as 'added value' up to now, focusing on the product innovation based on scientific knowledge innovation. It means the businessman should be an illuminated patron, who should bet on the vision that, the research world knows, is not utopic and focus on a transition future that is coming.

Briefly, this has been our research goal: considering the circular economy dynamics, we want to create value chains of circular Bioeconomy based on the valorisation of the wastes from no-food dedicated cultivations – like cutting timber woods (negative forestry waste) or recycling processing wastes with high biological intensity – extending their lifecycle and taking into consideration their potentiality for carbon storage. It is a meaningful strength that incentivises also the local Bodies to promote industrial initiatives acting in such a direction. The innovation, which is based on the definition of the 'on demand' material according to the physical and technical char-

acteristics needed, is the real strength of the Design, at both a theoretical and an applicative level, and its intrinsic limit at the same time. The future developments of this research activity can see the creation of an academic spin-off giving the firms that intend to invest in research and innovation but have no skilled professionals within their firms, the necessary expertise to define dosages and procedures that are difficult to be standardised. The innovation of a product, we got thanks to this research, has intrinsically an innate innovation of process imposing a continuous research activity that can plan, case by case, the component with its best performances.

The potentiality within this material, with properties of thermal and acoustic insulation, able to contribute to both the reduction of the quantity of plastic at global level, according to the EU Plans, and the different applications in semi-products and final products and the use of traditional machinery without any necessity of large capital investments to renew the production system, make it competitive and a potential partner for the technology of different industrial realities (es. Mogu – radical by nature). From the circularity point of view, the Report on Circular Economy in Italy in 2021 (Circular Economy Network, 2021) let us face a brutal reality: we are all developing countries before the circular economy.

Acknowledgements

The contribution, which is part of the research activities carried out by the ZEBtwdZEEB Group of the DA-DI of the Università della Campania 'L. Vanvitelli' on innovative bio-based materials carried out in collaboration with Service Biotech Srl, is the result of a common reflection of the Authors. Nevertheless, the introductory paragraph and 'The background' are by M. Cannaviello, 'Research and Method: protasis and apodosis' and 'Conclusions' are by A. Violano, the paragraph 'Innovation and experimentation: a material more than a product' is by S. Del Prete. We thank Dr. D. Marasco for her active collaboration in the testing phase. For the publication of this article, we thank the VALERE Programme of the Università della Campania 'Luigi Vanvitelli', which awards grants for the dissemination of open access research products.

Notes

- 1) More information at: ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [Accessed 15 April 2021].
- 2) The definition is provided by CEN/TC 411 2014 and taken up in the Expert Group Report – Review of the EU Bioeconomy Strategy and its Action Plan (European Commission, 2017).
- 3) ASTM D6866 was developed in the United States in 2004 as a standardised analytical method for determining the renewable content of solid, liquid or gaseous samples by radiocarbon dating.
- 4) ISO 16620:2015 has been partly updated by ISO 16620-2:2019 – Plastics – Biobased content.
- 5) Compostability is a characteristic of packaging or generally of a plastic that allows it to decompose during a composting process.
- 6) UNI EN 13432:2002 – Packaging – Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation – Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging.
- 7) Laboratories shall be certified according to UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- 8) UNI EN14995:2007 – Plastics – Evaluation of compostability – Test scheme and specifications.
- 9) More information at the webpage: epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data [Accessed 15 April 2021].
- 10) More information at the webpage: nomisma.it/osservatorio-packaging-del-largo-consumo/ [Accessed 15 April 2021].

References

Cannaviello, M. (2017), *La sfida dell'impronta di carbonio del cantiere edile | Tackling carbon footprint of construction site*, La scuola di Pitagora editrice, Napoli.

Cerimi, K., Can Akkaya, K., Pohl, C., Schmidt, B. and Neubauer, P. (2019), "Fungi as source for new biobased materials – A patent review", in *Fungal Biology and Biotechnology*, vol. 6, article 17, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y [Accessed 15 April 2021].

Circular Economy Network (2021), *3° Rapporto sull'Economia Circolare in Italia – Focus sull'economia circolare nella transizione alla neutralità climatica*. [Online] Available at: circularconomynetwork.it/wp-content/uploads/2021/03/3%20B0-Rapporto-economia-circolare_CEN.pdf [Accessed 15 April 2021].

Curran, M. A. (2010), "Biobased materials", in *Kirk-Othmer – Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons. [Online] Available at: doi.org/10.1002/0471238961.biobcurr.a01 [Accessed 15 April 2021].

Dahiya, S., Katakjwala, R., Ramakrishna, S. and Venkata Mohan, S. (2020), "Biobased Products and Life

Cycle Assessment in the Context of Circular Economy and Sustainability", in *Materials Circular Economy*, vol. 2, article 7, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s42824-020-00007-x [Accessed 15 April 2021].

Dobrucka, R. (2019), "Bioplastic packaging materials in circular economy", in *LogForum*, vol. 15, issue 1, pp. 129-137. [Online] Available at: doi.org/10.17270/J.LOG.2019.322 [Accessed 15 April 2021].

European Commission (2020), *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*, document 52020PC0080, 80 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0080&qid=1619929730292 [Accessed 16 April 2021].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1619930051365 [Accessed 16 April 2021].

European Commission (2018), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*, document 52018DC0028, 028 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN [Accessed 16 April 2021].

European Commission (2017), *Expert Group Report – Review of the EU Bioeconomy Strategy and its Action Plan*. [Online] Available at: core.ac.uk/download/pdf/227290013.pdf [Accessed 16 April 2021].

Federici, F., Fava, F., Kalogerakis, N. and Mantzavinos, D. (2009), "Valorisation of agro-industrial by-products, effluents and waste: concept, opportunities and the case of olive mill wastewaters", in *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 84, issue 6, pp. 895-900. [Online] Available at: doi.org/10.1002/jctb.2165 [Accessed 15 April 2021].

Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile and FISE UNICIRCULAR (2020), *L'Italia del Riciclo – 2020*. [Online] Available at: doi.org/10.1002/jctb.2165 [Accessed 15 April 2021].

Manuelli, M. T. (2020), "In che modo il packaging sostenibile guiderà le scelte della nostra spesa", in *IlSole24Ore*, newspaper, 28/02/2020. [Online] Available at: 24plus.ilsole24ore.com/art/il-packaging-sostenibile-guida-scelte-spesa-business-65-miliardi-ACNF7WJB [Accessed 15 April 2021].

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to cradle – Remaking the way we make things*, North Point Press, New York.

Narayan, R. (2012), "Biobased & Biodegradable Plastics – Rationale, Drivers, and Technology Exemplars", in Khemani, K. and Scholz, C. (eds), *Degradable Polymers and Materials – Principles and Practice (2nd Edition)*, ACS Publication, pp. 13-31. [Online] Available at: doi.org/10.1021/bk-2012-1114.ch002 [Accessed 15 April 2021].

National Bioeconomy Coordination Board (2021), *Implementation Action Plan (2020-2025) for the Italian Bioeconomy Strategy Bit II*. [Online] Available at: cnbb-sv.palazzochigi.it/media/2078/iap_2332021.pdf [Accessed 15 April 2021].

Netti, M. and Cannaviello, M. (2018), "Blockchain technology – Opportunities for sustainability of construction sector", in *Beyond all Limits 2018 – International Congress on Sustainability in Architecture, Planning, and Design, 17-19 October 2018, Ankara, Turkey*, Cankaya University Press, pp. 558-562.

Plastics Europe (2019), *The Circular Economy for Plastics – A European Overview*. [Online] Available at:

plasticseurope.org/download_file/force/3259/181 [Accessed 15 April 2021].

Scalisi, F. and Spósito, C. (2020), "Measure the Embodied Energy in Building Materials – An Eco-Sustainable Approach for Construction", in Sayigh, A. (ed.), *Renewable Energy and Sustainable Buildings, Selected Papers from the World Renewable Energy Congress WREC 2018, University of Kingston, UK, 30 July-3 August 2018*, Springer, Cham (Switzerland), pp. 245-256. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-18488-9_19 [Accessed 15 April 2021].

Spósito, C. and Scalisi, F. (2019), "A possible tool for the choice of building materials – The environmental product declaration (EPD)", in Bisson, M. (ed.), *3rd International Conference on Environmental Design, 3-4 October | Marsala – Sicily*, Palermo University Press, Palermo, pp. 189-199. [Online] Available at: demetracerimed.com/wp-content/uploads/2020/07/A-possible-tool-for-the-choice-of-building-materials_2019-1.pdf [Accessed 15 April 2021].

UN – General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E [Accessed 14 April 2021].

Venkata Mohan, S., Modestra, J. A., Amulya, K., Butti, S. K. and Velvizhi, G. (2016), "A Circular Bioeconomy with Biobased Products from CO₂ Sequestration", in *Trends in Biotechnology*, vol. 34, issue 6, pp. 506-519. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.012 [Accessed 15 April 2021].

Violano, A. (2018), "Oltre la Materia – La sperimentazione di bio-based grown materials dai miceli | Beyond Materials – The experimentation of bio-based grown materials from mycelia", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 299-307. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23029 [Accessed 15 April 2021].

Violano, A. and Del Prete, S. (2020), "Dentro la materia – L'analisi SEM per la determinazione delle prestazioni di materiali bioplastici innovativi | Within the matter – Determining the performance of innovative bioplastic materials with SEM analysis", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 7, pp. 174-179. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/7182020 [Accessed 15 April 2021].

World Green Building Council (2019), *Bringing embodied carbon upfront – Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. [Online] Available at: worldgbc.org/bringing-embodied-carbon-upfront-report-download [Accessed 15 April 2021].