

## AMBIENTE COSTRUITO E SOSTENIBILITÀ Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche

## BUILT ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices

Cesare Sposito, Francesca Scalisi

### ABSTRACT

In un contesto di emergenza ambientale per il quale il settore edile è uno dei principali responsabili, in quanto consuma il 40% dell'energia (incorporata e operativa) e produce circa un terzo dei rifiuti totali prodotti, e in ragione degli obiettivi ambiziosi fissati dalla comunità internazionale e da numerosi Paesi per ridurre l'impatto ambientale delle costruzioni durante l'intero ciclo vita, il presente articolo intende offrire un contributo alla conoscenza dello stato dell'arte su attività di ricerca, sperimentazioni e buone pratiche sostenibili che il settore delle costruzioni e l'accademia hanno attivato negli ultimi anni. In particolare, riferisce di azioni teoriche e sperimentali di impronta circolare che interessano innovazioni di processo e di prodotto alle diverse scale ('macro', 'meso' e 'micro') dell'ambiente costruito capaci di superare il tradizionale approccio lineare in luogo di un approccio che mira, da un lato, a estendere il suo ciclo di vita utile, dall'altro, a valutare nuovi materiali bio-based facilmente rigenerabili e con una bassa energia incorporata; conclude infine mettendo in luce le criticità che ad oggi ne frenano la diffusione e individua possibili azioni di ricerca che possano favorire, con il contributo della Tecnologia dell'Architettura, la transizione verso questo nuovo paradigma.

In the context of environmental emergency of which the construction sector is one of the main causes – since it consumes 40% of the (embodied and operational) energy and produces about a third of the total waste – and due to the ambitious objectives set by the international community and by many countries to reduce the environmental impact of buildings during their whole life cycle, this paper wants to make a contribution to the understanding of the state of the art on cycle-based research activities, sustainable experiments and good practices that the building industry and the academy have implemented in recent years. In particular, it refers to cycle-based theoretical and experimental actions involving process and product innovations at different scales (macro, meso and micro) of the built environment. They are capable of overcoming the traditional linear approach to use an approach aiming, on the one hand, to extend the service life cycle, and on the other, to evaluate new bio-based materials, easily renewable and with a low embodied energy. In the end, the paper highlights the problems that currently hinder its dissemination and identifies possible research actions that can favour, with the contribution of Building Technology, the transition to this new paradigm.

### KEYWORDS

economia circolare, ambiente costruito, sostenibilità, design for disassembly, materiali riciclati

circular economy, built environment, sustainability, design for disassembly, recycled materials

**Cesare Sposito**, PhD architect, is an Associate Professor at the Department of Architecture of the University of Palermo (Italy). His main research interests are environmental sustainability, innovative materials for architecture, nanomaterials, energy saving in buildings and the conservation process focusing in particular on sheltering systems for archaeological sites. Mob. +39 328/00.89.765. E-mail: cesare.sposito@unipa.it

**Francesca Scalisi**, PhD Architect and Research Manager at DEMETRA Ce.Ri.Med. (Euro-Mediterranean Documentation and Research Center), Palermo, Italy. Her research areas are the sustainability of the built environment, energy conservation of buildings, green materials, nanotechnologies. E-mail: demetracerimed.scalisi@gmail.com

I temi del cambiamento climatico, dell'utilizzo eccessivo di suolo e di risorse non rinnovabili, della produzione sempre crescente di scarti e sfabbricidi sono entrati di fatto nel nostro quotidiano. Rispetto a tali questioni, il settore delle costruzioni è uno dei principali responsabili, poiché assorbe circa il 40% del consumo totale di energia nei Paesi europei e produce circa un terzo dei rifiuti totali (European Environment Agency, 2019). Per ridurre l'impatto degli edifici sull'ambiente, l'Unione Europea e i suoi Stati membri hanno promosso negli ultimi decenni dapprima edifici a basso consumo energetico poi quelli di tipo passivo, fissando l'obiettivo ambizioso, entro il 2050, di edifici a zero emissioni (European Commission, 2019a).

L'energia complessiva impiegata nel ciclo di vita di un edificio è determinata dall'energia incorporata e dall'energia operativa (Treloar, Love and Holt, 2001; Gonzalez and Navarro, 2006; Barucco, Verde and Scalisi, 2016). Mentre è abbastanza intuitiva la definizione di quest'ultima in quanto rappresenta la quantità di energia richiesta nella fase di esercizio degli edifici per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda sanitaria e l'illuminazione (Malmqvist et alii, 2018), la definizione dell'energia incorporata è più articolata – e ancora più complessa è la sua quantificazione – in quanto non solo interessa l'energia utilizzata nella fase di produzione dei singoli materiali ma tiene conto anche dell'intero ciclo di vita, con un'analisi 'dalla culla alla tomba' che comprende l'energia necessaria per l'estrazione delle materie prime, la loro lavorazione e il trasporto nonché l'energia periodica per la manutenzione e quella finale per lo smaltimento (Hammond and Jones, 2008; Dixit et alii, 2010; Thomas, Menassa, and Kamat, 2016; Scalisi and Sposito, 2020). Per valutare il reale impatto di un edificio, al netto dell'energia operativa, è necessario quindi quantificare l'energia incorporata di tutti i prodotti e i processi utilizzati nelle fasi di progettazione, costruzione, manutenzione, sostituzione e demolizione (Vukotic, Fenner, and Symons, 2010), dal cui calcolo è da escludere quella prodotta da fonti rinnovabili; quindi, l'energia incorporata complessiva è calcolata sommando l'energia incorporata iniziale, quella ricorrente e quella necessaria alla demolizione del manufatto (Dixit, 2019).

Studi e ricerche hanno evidenziato che circa la metà dell'impatto ambientale degli edifici durante l'intero ciclo vita è determinata dall'energia incorporata poiché molti materiali da costruzione sono prodotti con combustibili fossili e loro derivati (Sanchez and Haas, 2018), ma hanno anche dimostrato che le risorse non rinnovabili si stanno rapidamente esaurendo (Circle Economy, 2020). Da qui, la necessità di ottimizzare l'insieme delle prestazioni ambientali dei nuovi edifici valutandone soprattutto l'energia incorporata e i relativi impatti durante l'intero ciclo di vita (Dixit et alii, 2012; Birgisdottir et alii, 2017; Rasmussen et alii, 2017).

Il tradizionale 'approccio lineare', che nella pratica delle costruzioni si traduce nel 'prendere', 'utilizzare', 'consumare' e 'smaltire' (Campbell-Johnston et alii, 2019), è stato da più ricercatori individuato come la causa principale del-

l'impoverimento delle risorse non rinnovabili e della produzione di scarti, connotando così l'attività edilizia come una delle pratiche antropiche più insostenibili per il pianeta (Jiménez-Rivero and García-Navarro, 2017a). Principi e applicazioni dell'economia circolare, in risposta alla cogente necessità di riduzione degli impatti ambientali e di un uso efficiente delle risorse non rinnovabili, iniziano a riscontrare l'interesse del mondo delle costruzioni, grazie anche agli studi condotti dalla Ellen MacArthur Foundation (2015a) la quale ha individuato sei aree di azione – denominate ReSOLVE (REgenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise e Exchange) – per le imprese e i Paesi che intendono muoversi verso l'economia circolare, in un'ottica di sviluppo sostenibile e salvaguardia delle generazioni future (UN – General Assembly, 2015; European Commission, 2018, 2020; Fig. 1).

L'economia circolare emerge quindi come un nuovo modello che cerca di ripensare uno sviluppo economico meno dipendente, se non del tutto indipendente, dal consumo di risorse finite non rinnovabili (Ellen MacArthur Foundation, 2015b), così come suggerito da Walter Stahel, già negli anni Settanta, nel suo rapporto di ricerca dal titolo *The Potential for Substituting Manpower for Energy* consegnato alla Commissione Europea; l'architetto svizzero, insieme a Genevieve Reday, delinea la visione di un'economia in 'loop' e il suo impatto sul lavoro, sullo sviluppo economico, sul risparmio di risorse e sul controllo dei rifiuti, coniando l'espressione 'cradle to cradle' (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Sulla scia di questa intuizione, dagli anni Ottanta si fa strada la convinzione che gli effetti dei processi industriali dovrebbero servire come materie prime per altri processi, funzionando così come un 'ecosistema biologico' (Frosch and Gallopoulos, 1989), sviluppando un tipo di progettazione basato su due cicli circolari, il ciclo tecnico e quello biologico (Fig. 2), in cui le risorse vengono trattenute il più a lungo possibile, con una minima perdita di qualità e rifiuti (McDonough and Braungart, 1998, 2002, 2013; Fig. 3).

Alla luce del menzionato contesto culturale, il presente articolo intende offrire un contributo alla conoscenza dello stato dell'arte su attività di ricerca, sperimentazioni e realizzazioni di impronta circolare che il settore delle costruzioni e l'accademia hanno attivato negli ultimi anni. In particolare, riferisce di azioni teoriche e sperimentali di impronta circolare che interessano innovazioni di processo e di prodotto alle diverse scale ('macro', 'meso' e 'micro') dell'ambiente costruito capaci di superare il tradizionale approccio lineare in luogo di un approccio che mira, da un lato, a estendere il suo ciclo di vita utile, dall'altro, a valutare nuovi materiali bio-based facilmente rigenerabili e con una bassa energia incorporata; conclude infine mettendo in luce le criticità che ad oggi ne frenano la diffusione e individua possibili azioni di ricerca che possano favorire, con il contributo della Tecnologia dell'Architettura, la transizione verso questo nuovo paradigma.

**Buone pratiche 'circolari'** | Secondo Francesco Pomponi e Alice Moncaster (2017), le azioni di ricerca che intervengono sull'ambiente costruito in chiave circolare si articolano su tre li-

velli: il macro (città e quartieri), il meso (edifici) e il micro (materiali e componenti). La ricerca relativa ai livelli macro e micro risulta più avanzata, la prima sviluppandosi all'interno del concetto di eco-città (Van Berkel et alii, 2009), la seconda sulla dimensione materiale e sulla gestione circolare della catena di approvvigionamento (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007; Lacy and Rutqvist, 2015) con margini di miglioramento legati alle potenzialità dell'ICT e dell'IoT. Il livello meso presenta una complessità differente, essendo gli edifici entità uniche, in cui ciascuno dei materiali utilizzati ha un proprio specifico ciclo di vita e una vita utile di lungo periodo che può generare incertezza sugli scenari futuri. A queste diverse scale, alcuni progetti hanno messo in pratica, negli ultimi anni, iniziative orientate a promuovere il cambio di paradigma del processo edilizio da lineare a circolare, tanto da essere classificati come buone pratiche a cui gli operatori del settore possono fare riferimento (CE100, 2016).

Un esempio di intervento circolare emblematico alla macro scala è quello del Queen Elizabeth Olympic Park di Londra (Fig. 4) che, coinvolgendo l'intero quartiere di Stratford, è stato assimilato a un progetto di rigenerazione urbana. Il Parco Olimpico è stato concepito ottimizzando il sistema costruttivo in vista di una successiva trasformazione della struttura, al termine dei Giochi, come stadio per una squadra di calcio locale, prevedendo il riuso di circa il 95% degli elementi costruttivi dismessi e il riciclo del 50% dei materiali che in alternativa sarebbero stati conferiti in discarica. Al di là delle specificità del progetto e delle soluzioni tecniche impiegate per raggiungere gli obiettivi dichiarati, preme sottolineare i risvolti sociali che nel 2014 la London Legacy Development Corporation, incaricata della trasformazione, è riuscita a generare; solo per citarne alcuni, si segnala la fornitura a oltre 40 associazioni di quartiere di materiali e componenti (dismessi) di cui le stesse avevano bisogno, ma anche l'Hub 67 (Fig. 5), un centro per la comunità di un altro quartiere, quello di Hackney, che promuove progetti di valenza sociale per i residenti, i giovani e le scuole, realizzato per l'80% con materiali provenienti dal Parco Olimpico.

Rispetto alla meso scala, un secondo intervento degno di nota è la ristrutturazione della Liander (Figg. 6-9) di Duiven, nei Paesi Bassi, del 2015. La società elettrica ha trasformato la propria sede in un edificio straordinariamente sostenibile capace di produrre più energia di quella che consumano i 24.000 metriquadri e i 1.500 dipendenti, diventando il primo progetto di ristrutturazione nei Paesi Bassi ad ottenere il certificato di sostenibilità BREEAM-NL. Oltre alle diverse azioni che hanno portato a recuperare l'80% delle superfici originarie e a impiegare fino al 93% di materiali secondo una logica circolare, l'elemento che caratterizza l'intervento è la grande copertura, che collega sei diversi volumi preesistenti, progettata con il supporto tecnico di un'azienda che, grazie al know-how acquisito realizzando montagne russe, è riuscita a ottimizzare la struttura rendendola più leggera, riducendo l'impiego di materie prime e prevedendo nodi e connessioni che facilitano lo smontaggio della copertura per il



Fig. 1 | Making sense of the Circular Economy: the 7 key elements (source: circle-economy.com).

successivo riutilizzo. Il caso in esame dimostra come la progettazione circolare possa trovare giovamento da sinergie e competenze con operatori diversi da quelli a cui tradizionalmente l'edilizia si è riferita, perché per rompere con la cultura lineare del passato è necessario pensare e agire in modo diverso.

Alla scala micro, il pannello BioBuild (Figg. 10-13), componente strutturale per il rivestimento di facciate in biocomposito, riassume la filosofia del progetto circolare ed è emblematico di come la circolarità possa raggiungersi con l'impiego di materiali alternativi, innovativi e bio-based. Finanziato dal Settimo Programma Quadro dell'Unione Europea per la Ricerca e lo Sviluppo Tecnologico, il BioBuild già dal 2015 risponde all'esigenza di ridurre l'energia incorporata e abbattere il costo di produzione rispetto a soluzioni tradizionali che impiegano materie prime non rinnovabili. Il pannello è realizzato con una miscela di fibre naturali (estratte da piante di lino, canapa e iuta) e di resine naturali (derivate dai residui della raccolta della canna da zucchero e della soia) ottenute da piante a crescita rapida, che si rigenerano in brevi cicli di 3 o 4 mesi, e da residui agricoli.

Prodotto con dimensioni massime di 4 x 2,3 metri e spessore variabile in funzione della sua altezza, il BioBuild è composto da due laminati in biocomposito e da uno strato centrale di materiale isolante, ha una densità di 1.200 Kg/mc che lo rende più leggero e resistente rispetto ai pannelli realizzati con i tradizionali compositi a base di petrolio e alluminio, e si caratterizza per una trasmittanza termica di circa 0,2 W/m<sup>2</sup>K che agevola l'eliminazione dei ponti termici delle facciate. Ma il dato che appare più significativo riguarda l'energia incorporata la quale, rispetto a pannelli con prestazioni simili ma realizzati con alluminio o compositi a base di petrolio, è ridotta del 50%. Tutte le componenti del sistema sono facilmente smontabili e possono essere riciclate o riutilizzate alla fine del loro ciclo di vita che tra gli scenari attuali prevede la triturazione e il riuso come paccame o l'incenerimento.

L'uso di questo particolare biocomposito promuove quindi un modello circolare in cui la vegetazione a crescita rapida, costantemente rigenerata, diviene risorsa inesauribile e materia prima per produrre materiali e realizzare compo-

nenti edilizi senza alterare l'ecosistema locale, attivando al contempo nuove opportunità d'impresa e di sviluppo poiché gli scarti della produzione agricola e dalla manutenzione di aree a verde possono essere facilmente commercializzati.

**Approcci teorici e sperimentali circolari** | Uno dei pionieri dell'economia circolare, in senso lato, può essere individuato in John N. Habraken (1972) che ha definito il concetto di 'edificio aperto' e promosso un approccio alla progettazione degli edifici che tiene conto delle eventuali necessità di modifiche o adattamenti durante i loro cicli di vita in relazione a cambiamenti sociali e tecnologici del momento. Altri studi hanno poi definito teorie e metodologie progettuali per rendere le architetture flessibili, adattabili, modulari, ampliabili, mentre altri hanno avviato azioni di ricerca e alimentato il dibattito internazionale sulle possibilità offerte dal riciclo dei materiali edili, riportando anche progetti, materiali e modelli aziendali circolari strettamente legati al settore edile (Slaughter, 2001; Gosling et alii 2008; Støa, 2012; Schmidt III and Austin, 2016; Baker-Brown, 2017; Gorgolewski, 2018). In edilizia, il concetto di 'circolarità' può trovare applicazione con l'adozione delle 3R, Ridurre, Riutilizzare e Riciclare (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017), e in particolare, attraverso l'uso di materiali riciclati oppure con l'impiego di sistemi costruttivi a secco attraverso elementi e componenti prefabbricati, secondo il principio del Design for Disassembly (DfD).

In letteratura esistono diversi studi che hanno indagato quanto ciascuna delle due opzioni incida sul potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential – GWP) e risulti quindi in termini ambientali più sostenibile rispetto alle costruzioni tradizionali (Islam et alii, 2016; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019a; Birgisdóttir and Rasmussen, 2019). I risultati sono però spesso contrastanti perché se alcuni ricercatori riferiscono che il riciclo rappresenta la pratica più diffusa (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017), altre ricerche lo classificano come il meno efficace tra le 3R, poiché parte dei materiali da riciclare non trova una seconda vita o viene contaminata nel processo di trasformazione (Jiménez-Rivero and García-

Navarro, 2017b). Ulteriori studi promuovono il DfD e il suo reimpiego in più cicli di vita in quanto capace di ridurre gli sprechi da demolizione, nonostante sia condivisa la scarsa commerciabilità dei suoi componenti una volta usati (Akanbi et alii, 2019). Tuttavia, poche ricerche indagano sull'impiego congiunto di materiali riciclati e DfD e sul modo in cui gli stessi incidano sugli indicatori ambientali (Corona et alii, 2019). Tra i diversi studi analizzati se ne riportano tre, ritenuti interessanti per le risultanze e robusti per la metodologia di analisi impiegata.

Un primo studio è quello condotto da Rasmussen, Birkved e Birgisdóttir (2019b) i quali raffrontano due differenti progetti (redatti entrambi in base alla normativa danese) che hanno impiegato strategie diverse, l'uno quella del riciclo di materiali, l'altro quella della prefabbricazione finalizzata allo smontaggio e al riuso, per valutare quale delle due sia la più sostenibile (in termini di energia incorporata) e produca il minor impatto ambientale in relazione a un arco temporale a lungo termine di 120 anni. Il metodo di analisi impiegato è quello LCA secondo le norme europee EN 15804:2012+A2:2019 (CEN, 2019) e EN 15978:2011 (CEN, 2011), con un approccio da ciclo di vita multiplo che, promuovendo cicli continui di prodotti e materiali, meglio supporta la transizione verso un'economia di impronta circolare (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016; Niero et alii, 2016).

Per l'analisi del ciclo di vita, lo studio dei ricercatori danesi prende in esame le fondazioni, il telaio strutturale, le pareti interne ed esterne, le porte, le scale, le finestre, i solai e la copertura, tralasciando gli impianti e altri elementi di dettaglio quali connettori, staffe, ecc. Nel caso dell'edificio DfD lo studio riporta la specifica presenza di 800 kg di telai in alluminio utilizzati per la facciata e una struttura intelaiata prefabbricata in cemento armato. Le fasi del ciclo di vita indagate per entrambe le soluzioni sono quelle definite dalla citata norma EN 15978 (Tab. 1), ovvero produzione di materiali da costruzione (A1-A3), sostituzione di materiali da costruzione durante la fase di utilizzo (B4), trattamento dei rifiuti e smaltimento dei materiali a fine vita (C3-C4), mentre per l'edificio con filosofia DfD viene preso in considerazione anche il modulo D che restituisce gli impatti evitati derivanti da smontaggio, riuso, riciclo e recupero di materiali e componenti in sistema di prodotto (ciclo) successivo.

I risultati dello studio sono piuttosto interessanti ma a una prima lettura sembrano non fornire indicazioni per operare una scelta netta tra l'una o l'altra strategia. Infatti, nell'edificio realizzato con materiali provenienti da riciclo, la fase di produzione ha un basso impatto ambientale soprattutto se nella costruzione sono previsti prodotti in legno con un GWP negativo, mentre durante la fase di sostituzione e quella di fine vita, con il loro incenerimento e il rilascio del carbonio immagazzinato, si determinano impatti non indifferenti. Valori opposti si riscontrano nell'edificio realizzato secondo la filosofia DfD che si caratterizza per un considerevole impatto ambientale nelle fasi di produzione e sostituzione di materiali e componenti. I valori che accendono l'interesse sono invece quelli presenti nel modulo D, relativi solo a quelle parti che pos-



sono essere direttamente riutilizzabili in una 'seconda vita' (ovvero in un successivo sistema di prodotto): lo studio riscontra i primi (modesti) benefici a 60 anni con la sostituzione e il riutilizzo di rivestimenti di facciata e pavimenti in ceramica e benefici apprezzabili a 120 anni, a fine ciclo, quando materiali e componenti a base di cemento o profili di alluminio vengono riutilizzati in un nuovo sistema di prodotto, riducendo l'impatto ambientale rispettivamente a un quarto e un terzo rispetto agli omologhi della 'prima vita'. In sintesi, i valori GWP (espressi in kg di CO<sub>2</sub>-eq/mq/anno) dei due edifici sono pressoché equivalenti, in quanto per il primo caso studio è pari a 4,7 mentre per il secondo è pari a 6,7, parametro che si riduce a 4,3 tenendo conto del modulo D (pari a 2,4), quindi con il reimpiego in un successivo sistema di prodotto.

Un altro interessante studio è quello condotto da Eberhardt, Birgisdóttir e Birkved (2019) su un edificio per uffici in cui l'intero fabbricato, e quindi anche la struttura in cemento armato, è progettato secondo la filosofia del DfD. Nel caso in esame, i tre ricercatori danesi, utilizzando il metodo LCA conforme ai requisiti stabiliti nella EN 15978, hanno preso in considerazione, oltre al GWP, altri indicatori di impatto<sup>1</sup> (forse meno comuni ma comunque rilevanti rispetto all'ambiente, all'uso delle risorse e alla tossicità dei materiali), due possibili cicli vita a 50 e a 80 anni, due sistemi di prodotto successivi e quattro opzioni nelle quali gli elementi strutturali in cemento armato (che costituisco-

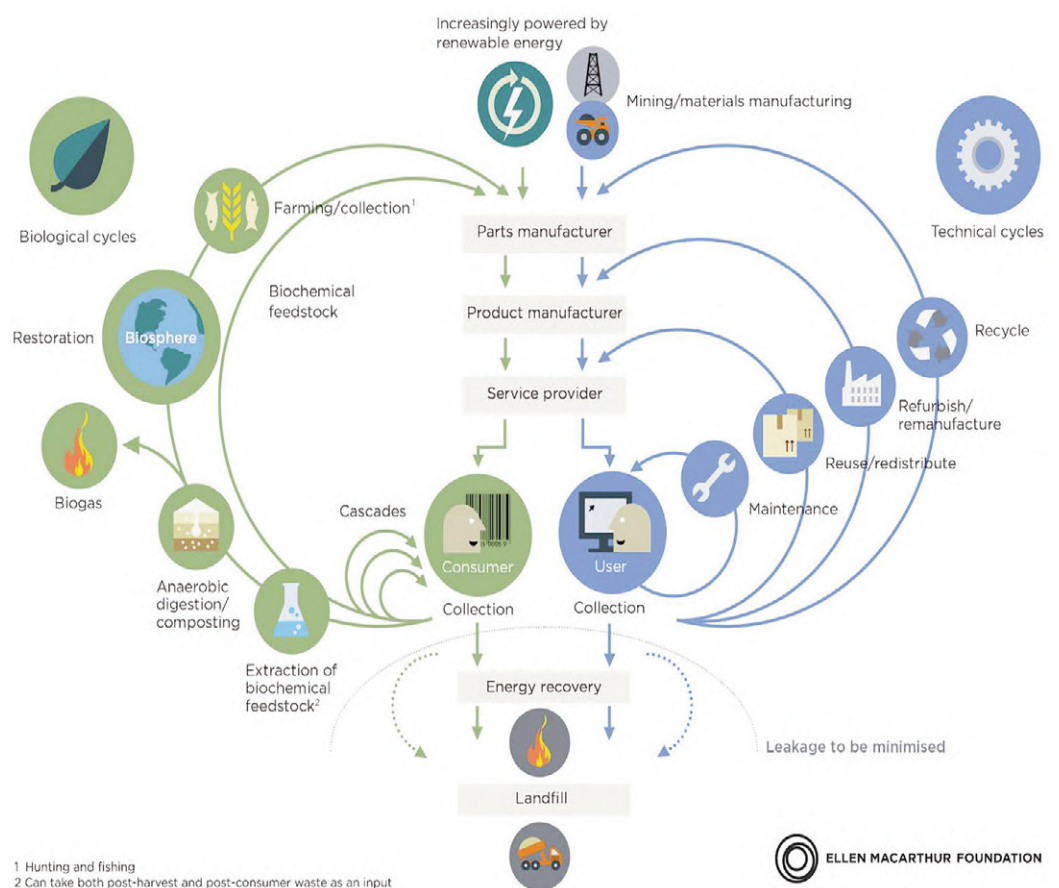
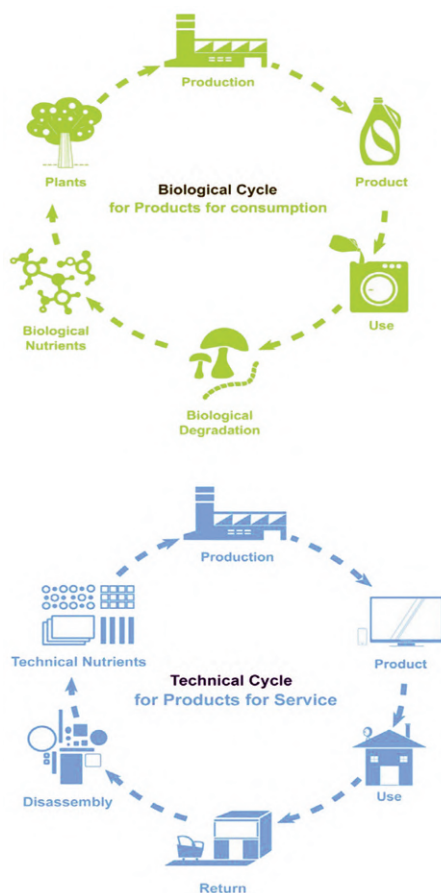
no la percentuale maggiore della massa dell'edificio) sono sostituiti con equivalenti in acciaio e legno.

Lo studio rivela che l'entità del risparmio in termini di impatto ambientale determinata dai diversi sistemi varia a seconda della categoria di impatto e dello scenario preso in esame – infatti la composizione del materiale ha un'influenza significativa sugli impatti ambientali incorporati dell'edificio – e dipende sia dal numero dei cicli di riutilizzo dei componenti sia dalla durata del materiale e del ciclo di vita dell'edificio. Pertanto, l'ottimizzazione di un singolo gruppo di componenti per ridurre i singoli impatti ambientali potenzialmente potrebbe non giovare necessariamente al livello di impatto complessivo dell'edificio nella stessa misura. Allo stesso modo lo studio non riporta in modo chiaro quali siano gli scenari, le opzioni o i materiali da preferire, mentre considera realistico che i potenziali risparmi di impatto dell'edificio DfD risultino apprezzabili al terzo ciclo di riutilizzo.

L'ultima ricerca recente presa in esame (Minunno et alii, 2020) indaga sui benefici ambientali generati dall'impiego congiunto delle due pratiche in un edificio prefabbricato che si sviluppa su 250 metriquadri e due livelli; il prototipo, progettato secondo i principi dell'economia circolare, delle 3R e del 'cradle-to-cradle', e con una particolare attenzione alle connessioni tra i diversi componenti modulari, è stato confrontato in termini di impatto ambientale<sup>2</sup> con un equivalente pensato secondo un approc-

cio lineare, ovvero secondo tradizionali tecniche di costruzione modulare che consentono agli edifici prefabbricati di essere utilizzati una sola volta per essere poi, al termine del primo ciclo di vita, demoliti, conferiti a discarica o parzialmente riciclati. Obiettivo della sperimentazione è anche individuare come e in che misura sia possibile utilizzare materiali provenienti da riciclo, come assemblare elementi e componenti edilizi per recuperarli dopo le sostituzioni parziali necessarie nella fase operativa, e come ottimizzare la produzione e le attività di montaggio e smontaggio per il riuso del maggior numero di componenti ed elementi edilizi.

L'edificio ideato secondo i principi dell'economia circolare è stato realizzato utilizzando 16.139 kg (sui 22.070 kg complessivi) di acciaio di recupero da elementi e componenti esistenti, che in alternativa sarebbero stati riciclati producendo un impatto ambientale non indifferente. Rispetto alla fase di produzione, l'acciaio (impiegato in telai strutturali, fondazioni, solai, coperture e rivestimento esterno del secondo livello), che rappresenta il 62% della massa dell'edificio, contribuisce al 70% dell'impatto ambientale totale dell'edificio nella maggior parte delle categorie prese in esame, mentre il legno (utilizzato per pavimenti, rivestimenti interni ed esterni del primo livello) è il secondo materiale con il maggior impatto (in ragione del 27% della massa dell'edificio) ed è responsabile di circa il 20% del GWP; stesso valore è stato riscontrato per un insieme di altri materiali, quali



**Fig. 2 |** Cradle to Cradle design paradigm: materials are categorized as either 'biological nutrients' or 'technical nutrients'. Biological nutrients are biodegradable and will easily reenter water and soil whereas technical nutrients will continually circulate as pure and valuable materials within closed-loop industrial cycles (source: c2cplatform.tv).

**Fig. 3 |** Circular Economy: an industrial system that is restorative by design (source: Ellen MacArthur Foundation, adapted from the Cradle to Cradle Design Protocol by Braungart and McDonough).



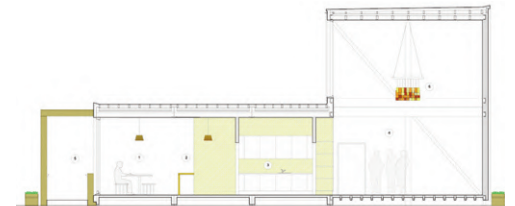


Fig. 4 | South Park Plaza at Queen Elizabeth Olympic Park in London, 2014 (source: fieldoperations.net).

Fig. 5 | Hub 67 in London, by Lyn Atelier, 2015 is a community centre that is designed for three to five years use and is constructed with recycled material from the London 2012 Olympic and Paralympic Games (source: fieldoperations.net).

ad esempio piastrelle moquette, vinili e isolanti.

Nella valutazione LCA del fine vita e utilizzo in un sistema di prodotto successivo sono stati inseriti la maggior parte dei materiali in quanto riutilizzabili o riciclabili, escludendo legno, rivestimenti del pavimento e isolanti. Per questo motivo, il potenziale di riscaldamento globale complessivo si riduce da circa 47,2 a 5,4 t di CO<sub>2</sub>-eq. Il riuso di circa 20 t di acciaio e il riciclo della rimanente parte sono i principali fattori che portano le diverse categorie di impatto a una riduzione di circa l'88%, ciò grazie al corretto impiego di connettori, dadi e bulloni che hanno permesso un ottimale smontaggio e riuso della struttura. Un altro dato di interesse riguarda la fase di produzione: secondo i ricercatori, il riuso dei componenti di seconda vita rispetto a equivalenti prodotti con nuovi materiali produce un risparmio di impatto pari al 28%, ovvero pari a 17,0 t di CO<sub>2</sub>-eq. Tra i punti di forza di questa ricerca sperimentale rileviamo l'affidabilità dei dati per l'analisi dell'inventario del ciclo di vita, meticolosamente misurati nella fase di costruzione dei due edifici, ma anche l'attenta progettazione delle connessioni che consente il facile smontaggio e rimontaggio dell'intero fabbricato al termine del primo ciclo di vita e dei suoi componenti modulari per le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria, con potenziali risparmi anche sui costi operativi. Di contro, i maggiori benefici ambientali sono riscontrabili solo dopo il riuso del pro-

totipo in diversi cicli di vita, condizione realistica solo per alcune destinazioni d'uso.

**Riflessioni conclusive e sviluppi futuri** | Siamo ancora all'inizio di un lungo percorso verso una transizione epocale. È comunque da chiedersi come mai, nonostante l'ampia letteratura sul tema e l'insieme di indicazioni promosse dalla Comunità Europea, non da ultimo l'European Green Deal (European Commission, 2019b), e dai singoli Stati, la maggior parte delle costruzioni realizzate in contesti privi di obbligatorietà normativa risponda ancora alle logiche della tradizionale impostazione lineare e rifiuti i principi di un'economia circolare improntata alle 3R. L'analisi della letteratura ha mostrato come la maggior parte degli studi si sia dedicata a valutare il ciclo di vita di materiali ed edifici, mentre poco è stato indagato sugli aspetti di processo, su quali siano i fattori abilitanti che possono favorire una fase di transizione verso l'edilizia circolare e le criticità che ne limitano la diffusione. Alcune risposte possono comunque essere trovate nei casi studio discussi.

Dall'analisi di questi ultimi emerge che il cluster dei tre attori chiave (committente, progettista, impresa esecutrice) di un processo edilizio tradizionale/lineare è stato assunto come riferimento anche nel processo edilizio circolare. Si evince inoltre che il committente svolge un ruolo determinante in quanto condiziona l'operatività di tecnici e imprese: un committen-

te illuminato, ambizioso, con risorse finanziarie adeguate e che desideri promuovere la propria immagine aziendale come sostenibile può attivare il processo per esplorare e realizzare il miglior progetto 'circolare', anche se una circolarità del 100% è attualmente difficile da raggiungere: la disponibilità sul mercato di materiali 'ad alto potenziale circolare' rappresenta una importante criticità, al pari di metodi e strumenti user-friendly che possano guidare i tecnici nella scelta delle migliori soluzioni disponibili. Anche i progettisti giocano un ruolo di rilievo nel processo in quanto possono, se in possesso di conoscenze adeguate su processo e materiali, stimolare e attivare la committenza verso un progetto innovativo e rispettoso dell'ambiente.

Rispetto poi alle due filosofie di intervento descritte (con materiali provenienti da riciclo e con sistemi DfD) è naturale chiedersi se siano equivalenti, se possano essere utilizzate indifferentemente negli appalti verdi e sostenibili, se la scelta tra l'una e l'altra opzione non sia da fare in relazione alle specificità del progetto o di uno specifico contesto economico, produttivo, geografico, culturale, oppure se siano da usare congiuntamente per minimizzare le diverse categorie di impatto. Per gli Autori del presente contributo, le due opzioni andrebbero valutate rispetto alla cogente questione climatica, preferendo nel breve termine la prima poiché consente già nel momento della costruzio-



ne una riduzione dell'energia incorporata certa e quindi benefici ambientali immediatamente calcolabili.

Dalle ricerche descritte, appare infatti che l'opzione offerta dagli edifici DfD prospetti benefici equivalenti alla prima opzione ma al termine di un arco temporale di 50, 80 o addirittura 120 anni, comportando il rischio probabile che gli scenari modellati possano essere lontani dalla realtà del momento: in teoria è come se acquisissimo un certo 'credito ambientale' che non avremo certezza di poter riscuotere in quanto gli scenari futuri non sono certi e prevedibili, anche in relazione a eventuali cambi di uso e funzioni del fabbricato, nuove criticità dovute al riscaldamento globale, differenti sistemi di smaltimento e di riciclo degli scarti, fonti energetiche diverse. Di contro questa strategia potrebbe essere da preferire, rispetto ai valori GWP riscontrati, se gli elementi e i componenti potessero essere disassemblati e riasssemblati in più di tre sistemi di prodotto e in cicli più brevi.

Gli sviluppi futuri sul tema che possono coinvolgere la Tecnologia dell'Architettura con il consolidato supporto della sua tradizione culturale e scientifica sono abbastanza ampi. Data la complessità del metodo LCA, che richiede competenze specifiche, una prima ricerca potrebbe riguardare l'analisi e lo sviluppo di metodi di valutazione degli impatti del tipo open source e user-friendly in grado di fornire un feedback tempestivo sulle decisioni già nella fase iniziale del progetto, riconsiderando l'insieme delle relazioni tra materiali provenienti da riciclo, sistemi costruttivi con filosofia DfD, impianti ed energia operativa. Nell'ambito del DfD hanno poi ampi margini di sperimentazione e sviluppo la progettazione di sistemi, componenti modulari ed elementi di connessione per facilitarne le relative azioni di smontaggio/montaggio così come rimane ancora da esplorare la commerciabilità di componenti edilizi di 'seconda vita', il costo per il loro riuso, la nuova certificazione e l'attrattività rispetto a omologhi componenti nuovi. E ancora, poiché in ambito mediterraneo i sistemi costruttivi a secco non forniscono una soluzione efficiente in termini energetici al pari dei sistemi massivi, un filone di ricerca potrebbe indagare le potenzialità di un trasferimento dei principi del Design for Disassembly sulle modalità costruttive tradizionali<sup>3</sup>, valutando strategie e sistemi costruttivi che riescano a coniugare le esigenze di massa e con quelle della reversibilità.

Anche il rapporto tra Progetto e Materia può essere ulteriormente indagato assumendo una nuova centralità nella questione ambientale e sviluppando approfondimenti e ricerche sullo studio di materiali naturali, rinnovabili e con ridotta energia incorporata «[...] without any media exhibition of the innovation, nor renouncing to use materials as a vehicle – and, together, as content – of the quality of space and architecture» (Antonini et alii, 2017, p. 1). Il citato esempio del pannello Biobuild può e deve stimolare il settore delle costruzioni e la comunità scientifica verso la ricerca di nuovi materiali bio-based facilmente rigenerabili in sostituzione di materie prime non rinnovabili (anche se riciclabili) per assicurare la sostenibilità e migliorare la qualità degli edifici, anche attraverso

le potenzialità offerte dalla stampa 3D (Sposito and Scalisi, 2017). Un ulteriore campo di indagine potrebbe riguardare l'analisi delle implicazioni sociali che le nuove filosofie di intervento possono determinare, in termini non solo di competenze professionali e di formazione e impiego di mano d'opera specializzata ma anche e soprattutto in termini di sensibilizzazione degli utenti verso la questione ambientale.

In definitiva «[...] per raggiungere la chiusura del ciclo della materia, l'ambiente costruito deve essere interamente ripensato, definendo nuove strategie di progettazione e modelli innovativi di business e di relazioni tra gli attori del processo nella gestione dei flussi di risorse» (Campioli et alii, 2018, p. 88). Dalla letteratura di riferimento emergono sei dimensioni fondamentali che possono incidere e condizionare la transizione verso l'economia circolare: il ruolo della politica, la dimensione economica, la dimensione ambientale, la dimensione comportamentale, la dimensione sociale, intesa come 'economia della condivisione', e la dimensione tecnologica (Pomponi and Moncaster, 2017) che comprende sia la gestione e l'archiviazione dell'enorme quantità di dati che un processo circolare richiede sia le numerose innovazioni tecnologiche utili alla produzione come, ad esempio, la citata stampa 3D. Diverse sono, pertanto, le variabili e le dimensioni che oggi condizionano gli operatori nella scelta tra un processo lineare e uno circolare. Probabilmente questo nuovo modello di sviluppo si consoliderà come prassi operativa quando le materie prime non rinnovabili diventeranno difficilmente reperibili e molto costose mentre i materiali provenienti da riciclo saranno largamente disponibili e con costi accessibili, ma soprattutto quando si diffonderà e si consoliderà la consapevolezza che l'economia circolare determina un valore aggiunto non tanto in termini finanziari quanto rispetto ai più importanti risvolti sociali, contribuendo a migliorare la qualità di quell'ambiente che abbiamo l'obbligo morale di preservare per le generazioni future.

---

The subjects of climate change, excessive use of soil, renewable resources, ever-increasing production of waste and demolition waste have, in fact, entered our daily life. The building industry is one of the main causes of these subjects, as it absorbs about 40% of the total energy consumption in European countries and produces about a third of total waste (European Environment Agency, 2019). To reduce the impact of the buildings on the environment, over the last decades, the European Union and its member states have promoted first low-energy and then passive buildings, setting the ambitious goal of zero-emission buildings by 2050 (European Commission, 2019a).

The total energy used in the life cycle of a building is determined by the embodied energy and the operational energy (Treloar, Love and Holt, 2001; Gonzalez and Navarro, 2006; Barucco, Verde and Scalisi, 2016). While the definition of the latter is quite intuitive, since it represents the amount of energy required during operation of the buildings for heating, cooling,

ventilation, domestic hot water, and lighting (Malmqvist et alii, 2018), the definition of embodied energy is more difficult – and it is even more difficult its quantification – since it involves both the energy used in the building stage of each material and of the whole life cycle, with an analysis 'from cradle to grave', which includes the necessary energy to the extraction of raw materials, their processing and transport as well as periodic energy used for maintenance and the final energy for disposal (Hammond and Jones, 2008; Dixit et alii, 2010; Thomas, Menassa and Kamat, 2016; Scalisi and Sposito, 2020). To evaluate the real impact of a building, excluding operational energy, we should determine the embodied energy of all products and processes used in the design, building, maintenance, replacement and demolition stages (Vukotic, Fenner and Symons, 2010). From this calculation the energy produced by renewable sources has to be excluded. Therefore, the total embodied energy is the sum of initial, recurring, and demolition embodied energy of the artifact (Dixit, 2019).

Studies and research have shown that about half of the environmental impact of buildings during their whole life cycle is determined by embodied energy, since many building materials are produced with fossil fuels and their derivatives (Sanchez and Haas, 2018), but have also demonstrated that non-renewable sources are rapidly running out (Circle Economy, 2020). Hence, the need to optimize the overall environmental performance of new buildings mostly by assessing their embodied energy and their impact on the whole life cycle (Dixit et alii, 2012; Birgisdottir et alii, 2017; Ras-mussen et alii, 2017).

The traditional 'linear approach', that in building practice translates into 'take', 'make', 'consume', 'waste' (Campbell-Johnston et alii, 2019), has been identified by several researchers as the main cause of the impoverishment of non-renewable resources and waste production, thus defining building activity as one of the most unsustainable man-made practices for the planet (Jiménez-Rivero and García-Navarro, 2017a). Principles and applications of the circular economy, in response to the urgent need to reduce environmental impacts and an efficient use of non-renewable resources, are starting to attract the interest of the construction world, thanks also to the studies carried out by the Ellen MacArthur Foundation (2015a) which has identified six areas of action – called ReSOLVE (REgenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise and Exchange) – for business and countries aiming to shift towards circular economy, to reach sustainable development and to safeguard future generations (UN – General Assembly, 2015; European Commission, 2018, 2020; Fig. 1).

The circular economy therefore emerges as a new model seeking to rethink economic development as less dependent, if not entirely independent, from the consumption of non-renewable finite resources (Ellen MacArthur Foundation, 2015b) as it was suggested, already in the 1970s, by Walter Stahel in his research report entitled *The Potential for Substituting Manpower for Energy* presented to the European



**Fig. 6, 7** | Liander Headquarters in Duiven, by RAU Architects, 2015: the large atrium covered by an iconic roof that connects the six different volumes visually, programmatically as well as logistically (source: archdaily.com).

Commission. The Swiss architect, together with Genevieve Reday, outlined a 'loop' economy and its impact on work, economic development, resources saving and waste control, coining the expression 'cradle to cradle' (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Following this intuition, since the 1980s, there was a growing belief that the effects of the industrial processes should serve as raw materials for other processes, thus functioning as a 'biological ecosystem' (Frosch and Gallopoulos, 1989), developing a type of design based on two looping cycles: technical and biological cycles (Fig. 2), where the resources are kept as long as possible, with a minimal loss of quality and waste (McDonough and Braungart, 1998, 2002, 2013; Fig. 3).

In light of the above cultural context, this paper wants to make a contribution to the understanding of the state of the art on cycle-based research activities, experiments and creations that the building industry and the academy have implemented in recent years. In particular, it refers to cycle-based theoretical and experimental actions involving process and product innovations at different scales (macro, meso and micro) of the built environ-

ment. They are capable of overcoming the traditional linear approach to use an approach aiming, on the one hand, to extend the service life cycle, and on the other, to evaluate new bio-based materials, easily renewable and with a low embodied energy. In the end, the paper highlights the problems that currently hinder its dissemination and identifies possible research actions that can favour, with the contribution of Architectural Technology, the transition to this new paradigm.

**Good 'Circular' Practices** | According to Francesco Pomponi and Alice Moncaster (2017), the research actions operating on a circular basis on the built environment are divided into three levels: macro (city and neighbourhoods), meso (buildings) and micro (materials and components). The research concerning macro and micro levels appears more advanced. The first develops within the concept of an eco-city (Van Berkel et alii, 2009), the second within the material dimension and the circular management of the supply chain (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007; Lacy and Rutqvist, 2015) with room for improvement thanks to ICT and IoT potentialities. The meso level has a different com-

plexity, being the buildings single entities, in which each of the used materials has a specific life cycle and a long-term service life that can generate uncertainty about future scenarios. At these different scales, in recent years, some projects have implemented initiatives aimed at promoting the paradigm shift of the building process from linear to circular, so much so that they are classified as reference good practices for professionals of the sector (CE100, 2016).

A symbolic example of circular intervention on a macroscale is the Queen Elizabeth Olympic Park in London (Fig. 4) which, involving the whole Stratford District, has been compared to an urban regeneration project. The Olympic Stadium was designed by optimizing its building system, anticipating a later transformation of the structure, at the end of the Games, as a stadium for a local football team, and anticipating the reuse of about 95% of disused building materials and the recycling of 50% of materials, otherwise direct to landfill. Beyond the characteristics of the project and the technical solutions implemented to reach the intended purposes, we must underline the social consequences that in 2014 the London Legacy Development Corporation, in charge of the transformation, was able to generate. Just to name a few, the company supplied to over 40 neighbourhood associations materials and (disused) components that they needed, but also Hub 67 (Fig. 5), a community centre of another district – Hackney – that fosters social projects for the citizens, young people and schools, made at 80% with materials coming from the Olympic Stadium.

For the meso scale, another project worth mentioning is the renovation of the Liander (Fig. 6-9) in Duiven, the Netherlands, 2015. The electricity company has transformed its headquarters into an extraordinarily sustainable building capable of producing more energy than that consumed by 24,000 square metres and 1,500 employees, becoming the first renovation project in the Netherlands to obtain the BREEAM-NL sustainability certificate. Besides the different actions that have led to reuse 80% of the original surfaces and to use up to 93% of materials according to a circular logic, the element that characterizes the intervention is its large roof, which connects six preexisting buildings, designed with the technical support of a business that had acquired its know-how from building rollercoasters, and has managed to optimize the structure, making it lighter, reducing the use of raw materials and providing nodes and connectors that facilitate the disassembly of the roofing, so that it can be reused. The case study shows how circular design can benefit from synergies and competences of different operators than those that traditionally were a reference in the building sector, because to break with the linear culture of the past it is necessary to think and act differently.

At the micro scale, the BioBuild panel (Fig. 10-13), structural component to cover façades in biocomposite, sums up the philosophy of the circular project and it demonstrates how circularity can be achieved by using alternative, innovative and bio-based materials. Funded by



the Seventh Framework Programme of the European Union for Research and Technological Development, since 2015, BioBuild has already been responding to the need to reduce the embodied energy and the cost of production compared to traditional solutions that use non-renewable raw materials. The panel is made by the combination of natural fibres (extracted from flax, hemp and jute plants) and biological resins (derived from the residues of sugar cane and soya bean harvesting), obtained from fast-growing plants – regenerating in short cycles of 3 to 4 months – and from residual agricultural waste.

Produced with maximum dimensions of 4 x 2.3 metres and with variable thickness depending on its height, BioBuild is made of two biocomposite laminates and a central layer of insulating material, has a density of 1,200 Kg/m<sup>3</sup> which makes it lighter and more resistant than panels made with traditional oil-based composites and aluminium, and is characterized by a thermal coefficient of about 0.2 W/m<sup>2</sup>K which facilitates the elimination of thermal bridges of façades. The most significant data is the embodied energy. It is reduced by 50% compared to panels with similar performances but made with aluminium or oil-based composites. All system components can be easily disassembled and recycled or reused at the end of their life cycle. Current scenarios for the end of life include shredding the biocomposite, consequently used as mulch, or incineration.

Therefore, the use of this particular biocomposite promotes a circular model in which fast-growing plants, constantly regenerated, become an inexhaustible resource and raw material to produce materials and create building components without altering the local ecosystem. At the same time, it triggers new opportunities for business and development as waste from agriculture and maintenance of green areas can be easily sold.

**Theoretical and Circular Experimental Approaches** | One of the forerunners of circular economy, in a broad sense, could be considered John N. Habraken (1972). He defined the concept of open buildings and promoted an approach to building design that takes into ac-

count possible needs for modifications or adjustments during their life cycles according to social and technological changes of the moment. Some studies have defined design theories and methods to make flexible, adaptable, modular, expandable architectures, while others have started to research and to fuel the international debate on the possibilities offered by recycling building materials, also reporting circular projects, materials and business models closely linked to the building sector (Slaughter, 2001; Gosling et alii 2008; Støa, 2012; Schmidt III and Austin, 2016; Baker-Brown, 2017; Gorgolewski, 2018). In construction, the concept of ‘looping’ can be applied by implementing the 3Rs – Reduce, Reuse, and Recycle (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017) – and in particular, through the use of recycled materials or the use of dry construction systems though prefabricated elements and components, according to the Design for Disassembly (DfD) principle.

In literature, there are many studies that have investigated how each option affects the Global Warming Potential – GWP, resulting more sustainable than traditional buildings on an environmental level (Islam et alii, 2016; Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir, 2019a; Birgisdóttir and Rasmussen, 2019). However, the results are often conflicting. In fact, some researchers report that recycling is the most widespread practice (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017), while others classify recycling as the least effective among the 3Rs, since some of the materials to be recycled do not get a second life or are contaminated in the transformation process (Jiménez-Rivero and García-Navarro, 2017b). Other studies promote DfD and its reuse in more life cycles, since it can reduce demolition waste. However, they agree on the low marketability of its components once they are used (Akanbi et alii, 2019). Little research investigates the joint use of recycled materials and DfDs and how they affect environmental indicators (Corona et alii, 2019). Among the examined studies, we are reporting three studies considered interesting for their results and solid for the analysis methodology used.

The first study was carried out by Rasmussen, Birkved and Birgisdóttir (2019b). They

compare two different projects (both composed according to the Danish regulation) that have used different strategies, one the recycle of material strategy, the other the prefabrication strategy aimed at disassembly and reuse, to evaluate which one is the most sustainable (for embodied energy) and produces the lowest environmental impact on a long-term period of 120 years. They used the LCA analysis method according to European standards EN 15804: 2012+A2:2019 (CEN, 2019) and EN 15978: 2011 (CEN, 2011), with a multiple life cycle approach, which by promoting continuous cycles of products and materials, better supports the transition towards a circular economy (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016; Niero et alii, 2016).

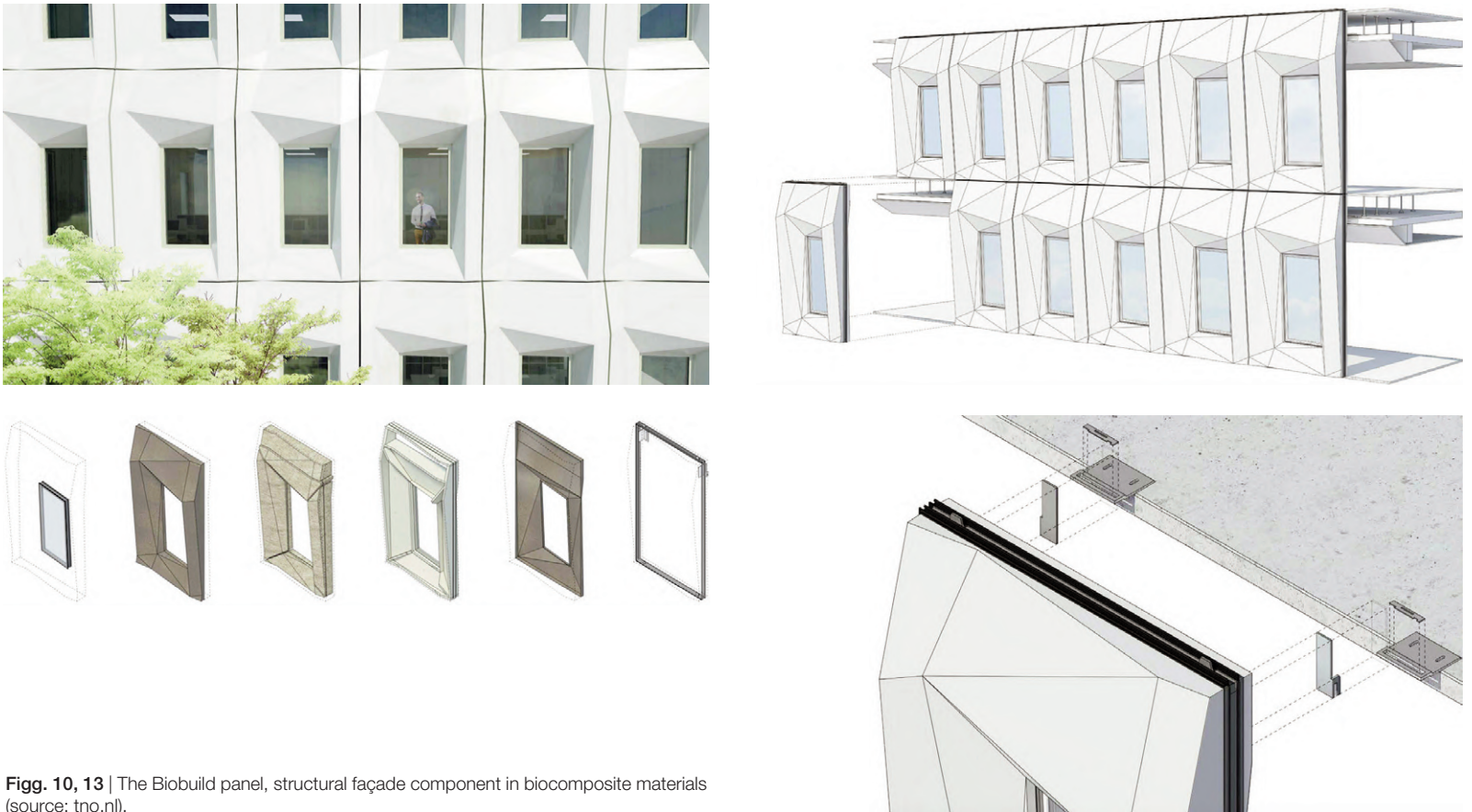
For the life cycle analysis, the study made by the Danish researchers covers foundations, frame, external and internal walls, doors and windows, staircases, roof, floor, ceiling, and does not include plants and other details such as connective items, brackets, etc. In the case of the DfD building, the study reports the specific presence of 800 kg of aluminium frames used for the façade and a prefabricated framed structure in reinforced concrete. The life cycle stages analysed in both solutions are described by the previously mentioned EN 15978 standard (Tab. 1), that is the production of building materials (A1-A3), replacement of building materials during the use stage (B4), waste treatment and disposal of end-of-life materials (C3-C4), while for the building with the DfD philosophy, module D is also taken into consideration, which shows the avoided impacts deriving from disassembly, reuse, recycle and recovery of materials and components in the next product (cycle) system.

The results of the study are quite interesting, however, at first, it appears they do not provide indications for making a clear choice between the strategies. In fact, in the building made with recycled materials, the production phase has a low environmental impact especially if the construction includes wood products with a negative GWP, while during the replacement and end-of-life phases, with incineration and release of stored carbon, there are significant impacts. Opposite values are found



**Fig. 8, 9** | Liander Headquarters in Duiven, by RAU Architects, 2015: the large atrium creates a continuous urban-like space which facilitates encounters and communication among employees (source: archined.nl).





**Figg. 10, 13** | The Biobuild panel, structural façade component in biocomposite materials (source: tno.nl).

in the building following the DfD philosophy. It is characterized by a considerable environmental impact in the production and replacement phases of materials and components. The D module contains interesting values concerning only the parts that can directly be used in a 'second life' (that is a subsequent product system). The study finds the first (moderate) benefits after 60 years, with the replacement and reuse of façade cladding and ceramic floor covering and significant benefits after 120, at the end of the cycle, when cement-based materials and components or aluminium profiles are reused in a new product system, reducing the environmental impact respectively to a quarter and to a third compared to the 'first life' counterparts. In a nutshell, the GWP values (expressed in kg of CO<sub>2</sub>-eq/sq.m/year) of the two buildings are almost equivalent. For the first case study it is 4.7, while for the second it is 6.7. This last parameter is reduced to 4.3 considering the D module (amounting to 2.4), therefore its reuse in the next product system.

Another interesting study was carried out by Eberhardt, Birgisdóttir and Birkved (2019) on an office building. The whole construction, and also the reinforced concrete structure, was designed according to the DfD philosophy. In this case, the three Danish researchers, using the LCA method in line with the requirements established in EN 15978, have taken into consideration, besides the GWP, other impact indicators<sup>1</sup> (which may be less common but still important for the environment, the use of resources and the toxicity of materials), two possible life cycles lasting 50 and 80 years, two subsequent product systems and four op-

tions in which the reinforced concrete structural elements (which make the largest percentage of the mass of the building) are replaced with steel and wood elements.

The study reveals that the extent of the environmental impact savings caused by the different systems varies according to the impact category and the scenario considered – in fact, the configuration of the material has a significant influence on the embodied environmental impacts of the building – and depends both on the number of reuse cycles of the components and on the duration of the material and the life cycle of the building. Therefore, the optimization of one group of components to reduce the single environmental impact, potentially, may not necessarily benefit to the overall impact level of the building in the same measure. Similarly, the study does not clearly report which scenarios, options or materials should be chosen, while it considers realistic that the potential impact savings of the DfD building can be substantial in the third reuse cycle.

The last analysed research (Minunno et alii, 2020) investigates the environmental benefits created by the joint use of the two practices in a prefabricated building with an area of 250 square metres and on two levels. The prototype, designed according to the principles of circular economy, of the 3Rs, and of the 'cradle-to-cradle', focusing particularly on the connection between the different modular components, has been compared, in terms of environmental impact<sup>2</sup>, with a counterpart designed according to a linear approach. That is, according to traditional modular building techniques that allow prefabricated buildings to be used only once and then, at the end of their

first life cycle, to be demolished, landfilled or partially recycled. The aim of the experimentation is to identify how and to what extent is possible to use recycled materials, how to assemble building elements and components to retrieve them after the partial necessary replacements of the operational stage, and how to optimize production and assembly and disassembly activities for the reuse of the greatest number of building components and elements.

The building created according to the principles of circular economy has been built using 16,139 kg of steel recovered from preexisting elements and components (about 22,070 kg in total), that otherwise would have been recycled originating a considerable environmental impact. Compared to the production stage, steel (used in structural frames, foundations, floors, roofs and external cladding of the second floor), which represents 62% of the mass of the building, contributes to 70% of the total environmental impact of the building in most of the categories considered, while wood (used for floors, internal and external cladding of the first floor) is the second material with the greatest impact (it represents 27% of the mass of the building) and is responsible for about 20% of its GWP. This value was found for a set of other materials, such as carpet, vinyl and insulating tiles.

In the LCA assessment on the end of life and use in a subsequent product system, most of the materials were included as they are reusable or recyclable, excluding wood, floor coverings and insulation. Because of that, the total global heating prospective decreases from 47.2 to 5.4 t of CO<sub>2</sub>-eq. The reuse of about 20 t of steel and the recycling of the rest are the main drivers of the reduction of 88% of the dif-

ferent impact categories. This is due to the proper use of connectors, nuts and bolts that have allowed an optimal disassembly and reuse of the structure. Another interesting data concerns the production stage. According to the researchers, the reuse of second life components produces an impact saving of 28%, or 17.0 t of CO<sub>2</sub>-eq compared to equivalents produced with new materials. Among the strengths of this experimental research we note the reliability of the data for the analysis of the life cycle inventory, meticulously measured in the construction stage of the two buildings, but also the careful design of the connectors that allow to easily disassemble and reassemble the whole building at the end of its life cycle and its modular components for ordinary and extraordinary maintenance activities, with potential savings also on operating costs. On the down side, the main environmental benefits can be seen after the reuse of the prototype in different life cycles, condition possible only for some uses.

**Final Considerations and Future Developments** | We are still at the beginning of a long path heading towards a historic transition. However, we should wonder why, despite the extensive literature on the subject and the set of guidelines promoted by the European Community, especially the European Green Deal (European Commission, 2019b), and by single States, most of the buildings made in contexts without regulations still respond to the logic of the traditional linear approach and reject the principles of a circular economy based on the 3Rs. The analysis of literature has shown how most of the studies are dedicated to evaluate the life cycle of materials and buildings, while the aspects of the process, which are the enabling factors that can favour a transition stage towards a circular building, and the problems limiting its dissemination have rarely been researched. Some answers can be found in the discussed case studied.

From these analyses it emerges that the cluster of the three key actors (client, designer, contractor) of a traditional/linear building process was taken as a reference also in the circular building process. It emerges that the clients play a decisive role, as they condition the operations of technicians and contractors: an enlightened, ambitious client with adequate financial resources and wishing to promote their corporate image as sustainable can activate the process to explore and implement the best ‘circular’ project, even if currently is difficult to achieve 100% circularity: the availability on the market of materials with ‘high circular potential’ is a relevant problem, as well as user-friendly methods and tools that can guide technicians in choosing the best solutions available. Designers also play an important role, because, if they have adequate knowledge of the process and materials, they can stimulate and push the client towards an innovative and environmentally friendly project.

Considering the two described intervention philosophies (with recycled materials and DfD systems), it is normal to wonder whether they are equivalent, whether they can be used equally in green and sustainable procurement, whether

the choice between the two options has to be done considering the characteristics of the project or of a specific economic, productive, geographical, cultural context, or if they have to be used together to minimize the different impact categories. The Authors of this paper think that the two options should be evaluated with respect to the mandatory climate issue, preferring the first in the short term since it allows, already in the building process, to reduce the embodied energy and therefore has immediately measurable environmental benefits.

From the research described, it appears that the option provided by the DfD buildings prospects benefits that are equivalent to the first option but at the end of a time span of 50, 80 or even 120 years. This would entail the probable risk that the modelled scenarios may be far from the reality of that moment. In theory, it is like we acquired a certain ‘environmental credit’ that we are not sure we will be able to collect, because future scenarios are not certain and predictable and also because of any changes in use and functions of the building, new problems due to global warming, different waste disposal and recycling systems, different energy sources. Conversely, this strategy could be chosen, compared to the observed GWP values, if the elements and components could be disassembled and reassembled in more than three product systems and in shorter cycles.

The future developments on the subject which can involve Building Technology with the consolidated support of its cultural and scientific traditions are quite broad. Given the complexity of the LCA method, which requires specific skills, a first research could concern the analysis and development of open source and user-friendly evaluation methods for the impacts, capable of providing a quick feedback on decisions already in the initial phase of the project, reconsidering the links between recycled materials, building systems with DfD philosophy, plants and operational energy. In the DfD field, the design of systems, modular components and connection elements can also be extensively experimented and developed, to

facilitate the relative disassembly/assembly actions, as well as the marketability of ‘second life’ building components, the cost for their reuse, the new certification and the attractiveness compared to homologous new components still remain to be explored. Furthermore, since in the Mediterranean area dry construction systems do not provide a solution as efficient as in massive systems in terms of energy, a line of research could investigate the potentialities of transferring the principles of Design for Disassembly to traditional construction methods<sup>3</sup>, evaluating construction and system strategies that can combine the needs of mass and reversibility.

Also the relation between Project and Matter can be deepened taking on a new central role on the environmental issue and developing in-depth analysis and research on natural, renewable materials with low embodied energy «[...] without any media exhibition of the innovation, nor renouncing to use materials as a vehicle – and, together, as content – of the quality of space and architecture» (Antonini et alii, 2017, p. 1). The previous example of the Bio-build panel can and must encourage the building industry and the scientific community to research new easily renewable bio-based materials to replace non-renewable raw materials (even if they are recyclable) to ensure sustainability and to improve the quality of buildings also through the potentialities offered by 3D printing (Sposito and Scalisi, 2017). Another research field could concern the analysis of the social implications that the new intervention philosophies can determine, not only for professional and training skills and use of skilled workforce but also and especially for raising users’ awareness towards the environmental issue.

Ultimately «[...] In order to close the loop of matter, the built environment has to be rethought with new design strategies, innovative business models and new relationship among different actors of resource management» (Campioli et alii, 2018, p. 88). From the reference literature emerge six fundamental dimensions that can affect and condition the transition to-

BUILDING LIFE CYCLE INFORMATION																Supplementary information beyond the building life cycle
A1-3			A4-5		B1-7							C1-4				D
Product stage			Construction process stage		Use stage							End of life stage				Benefit and loads beyond the system boundary
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse Recovery Recycling potential
Scenario			Scenario							Scenario						
Cradle to gate	M	M	M													M = Mandatory O = Inclusion Optional
Cradle to gate with options	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cradle to grave	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O

Tab. 1 | Information Forms for Building Products, adapted from EN 15978.



wards the circular economy: the role of politics, the economic dimension, the environmental dimension, the behavioural dimension, the social dimension, intended as 'sharing economy', and the technological dimension (Pomponi and Moncaster, 2017). The latter includes both the management and storage of the enormous amount of data that a circular process requires and the numerous technological innovations useful to the production as, for example, the aforementioned 3D printing. There-

fore, there are many variables and dimensions that currently influence the operators in the choice between linear and circular processes. Probably this new development model will consolidate as an operational practice when the non-renewable raw materials will become difficult to find and very expensive while the recycled materials will be widely available and affordable, but mostly when the awareness that the circular economy is an added value will be disseminated and consolidated, useful not to

budgets but to the more important social implications, helping to improve the quality of the environment that we have to preserve for future generations.

## Acknowledgements

The contribution, resulting from a common reflection, is to be assigned in equal parts to both Authors.

## Notes

1) The impact categories considered in the study are ODP – ozone depletion potential, POCP – photochemical ozone creation potential, AP – acidification potential, EP – eutrophication potential, ADPe – abiotic depletion potential for elements, ADPf – abiotic depletion potential for fossil resources, FAETP – freshwater aquatic ecotoxicity potential, MAETP – marine aquatic ecotoxicity potential, HTP – human toxicity potential and TETP – terrestrial ecotoxicity potential.

2) The impact categories selected by researchers are among the most commonly used in other similar studies. Therefore, besides the GWP, ODP, AP, EP, AD and ADFF were considered.

3) In Italy, with the Legislative Decree n. 56 dated 19 April 2017, the application of the Minimum Environmental Criteria of Green Public Procurement became mandatory in all public procurement. We note the creation of a kindergarten of 400 square metres designed and built in 2017, on behalf of the Ministry of Defense, in a civil area of the Military Airport of Grosseto. The project represents «[...] one of the first complete implementations of these Criteria [in the Mediterranean context], considering the innovation in the design process from a life cycle perspective, which is reflected in particular in the methods of selection and procurement of natural and eco-friendly materials, with recycled content and certificated products, as well as in the design for disassembly of building components» (Baiani and Altamura, p. 83).

## References

Antonini, E., Rossetti, M. and Giglio, F. (2017), *Call for papers | Techne 16 | Materia è Progetto*. [Online] Available at: [www.fupress.net/public/journals/38/CALL\\_16\\_ENG.pdf](http://www.fupress.net/public/journals/38/CALL_16_ENG.pdf) [Accessed 15 October 2020].

Akanbi, L., Oyedele, L., Delgado, J. M. D., Bilal, M., Akinade, O., Ajayi, A. and Mohammed-Yakub, N. (2019), "Reusability analytics tool for end-of-life assessment of building materials in a circular economy", in *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, vol. 16, n. 1, pp. 40-55. [Online] Available at: [doi.org/10.1108/wjstsd-05-2018-0041](https://doi.org/10.1108/wjstsd-05-2018-0041) [Accessed 15 October 2020].

Baiani, S. and Altamura, P. (2019), "Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/592019](https://doi.org/10.19229/2464-9309/592019) [Accessed 15 October 2020].

Baker-Brown, D. (2017), *Re-Use Atlas – A Designers*

*Guide towards the Circular Economy*, RIBA Publishing, London.

Barucco, M. A., Verde, F. and Scalisi, F. (2016), "Innovazione tecnologica di sistemi, componenti e materiali | Technological innovation of systems, components and materials", in Lucarelli, M. T., Mussinelli, E. and Trombetta, C. (eds), *Cluster in progress – La Tecnologia dell'architettura in rete per l'innovazione | The Architectural technology network for innovation*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RM), pp. 103-108.

Birgisdottir, H. and Rasmussen, F. N. (2019), "Development of LCAByg – A National Life Cycle Assessment Tool for Buildings in Denmark", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science | Central Europe towards Sustainable Building (CESB19), 2-4 July 2019, Prague, Czech Republic*, vol. 290, 012039, pp. 1-8. [Online] Available at: [doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012039) [Accessed 15 October 2020].

Birgisdottir, H., Moncaster, A., Houlihan Wiberg, A., Chae, C., Yokoyama, K., Balouktsi, M., Seo, S., Oka, T., Lützkendorf, T. and Malmqvist, T. (2017), "IEA EBC annex 57 – Evaluation of embodied energy and CO<sub>2</sub>eq for building construction", in *Energy and Buildings*, vol. 154, pp. 72-80. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.030](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.030) [Accessed 15 October 2020].

Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007), "Cradle-to-cradle design – Creating healthy emissions – A strategy for eco-effective product and system design", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, issues 13-14, pp. 1337-1348. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003) [Accessed 15 October 2020].

Campbell-Johnston, K., ten Cate, J., Elfering-Petrovic, M. and Gupta, J. (2019), "City level circular transitions – Barriers and limits in Amsterdam, Utrecht and The Hague", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, pp. 1232-1239. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.106](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.106) [Accessed 15 October 2020].

Campioli, A., Dalla Valle, A., Ganassali, S. and Giorgi, S. (2018), "Progettare il ciclo di vita della materia: nuove tendenze in prospettiva ambientale | Designing the life cycle of materials: new trends in environmental perspective", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 86-95. [Online] Available at: [doi.org/10.13128/Techne-23016](https://doi.org/10.13128/Techne-23016) [Accessed 15 October 2020].

CE100 (2016), *Circularity in the Built Environment – Case Studies – A Compilation of case Studies from the CE100*. [Online] Available at: [www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Built-Env-Co.Project.pdf](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Built-Env-Co.Project.pdf) [Accessed 18 October 2020].

CEN (2011), *EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*.

CEN (2019), *EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*.

Circle Economy (2020), *The Circularity Gap Report*

2020 – *When circularity goes from bad to worse – The power of countries to change the game*. [Online] Available at: [www.circularity-gap.world/2020](http://www.circularity-gap.world/2020) [Accessed 17 October 2020].

Corona, B., Shen, L., Reike, D., Rosales Carreón, J. and Worrell, E. (2019), "Towards sustainable development through the circular economy – A review and critical assessment on current circularity metrics", in *Resources Conservation and Recycling*, vol. 151, article 104498. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498) [Accessed 15 October 2020].

Dixit, M. K. (2019), "Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings – A review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 731-754. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.230](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.230) [Accessed 15 October 2020].

Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. and Culp, C. H. (2012), "Need for an embodied energy measurement protocol for buildings – A review paper", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, issue 6, pp. 3730-3743. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021) [Accessed 15 October 2020].

Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. and Culp, C. H. (2010), "Identification of parameters for embodied energy measurement – A literature review", in *Energy and Buildings*, vol. 42, issue 8, pp. 1238-1247. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016) [Accessed 15 October 2020].

Eberhardt, L. C. M., Birgisdottir, H. and Birkved, M. (2019), "Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly", in *Building Research and Information*, vol. 47, issue 6, pp. 666-680. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458](https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458) [Accessed 15 October 2020].

Ellen MacArthur Foundation (2016), *Circular Economy – Schools of Thought*. [Online] Available at: [www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought) [Accessed 16 October 2020].

Ellen MacArthur Foundation (2015a), *Delivering the Circular Economy – A Toolkit for Policymakers*. [Online] Available at: [www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_PolicyMakerToolkit.pdf](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_PolicyMakerToolkit.pdf) [Accessed 18 October 2020].

Ellen MacArthur Foundation (2015b), *Growth Within – A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. [Online] Available at: [www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_Growth-Within\\_July15.pdf](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf) [Accessed 16 October 2020].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan for a Cleaner and more Competitive Europe*, Document 52020DC0098, 98 final. [Online] Available at: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN) [Accessed 18 October 2020].

European Commission (2019a), *Going climate-neu-*

tral by 2050 – A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy. [Online] Available at: [op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1](http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1) [Accessed 17 October 2020].

European Commission (2019b), *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=COM%3A2019%3A640%3AFIN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN) [Accessed 17 October 2020].

European Commission (2018), *Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings – EU Construction and Demolition Waste Management*. [Online] Available at: [ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0\\_en](http://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en) [Accessed 18 October 2020].

European Environment Agency (2019), *The European environment – State and outlook 2020 – Knowledge for transition to a sustainable Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: [www.eea.europa.eu/publications/soer-2020](http://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020) [Accessed 17 October 2020].

Frosch, R. A. and Gallopoulos, N. E. (1989), “Strategies for manufacturing”, in *Scientific American*, vol. 261, n. 3, pp. 144-153. [Online] Available at: [www.jstor.org/stable/24987406](http://www.jstor.org/stable/24987406) [Accessed 15 October 2020].

Ghisellini, P., Cialani, C. and Ulgiati, S. (2016), “A review on circular economy – The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 114, pp. 11-32. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007) [Accessed 15 October 2020].

Gonzalez, M. J. and Navarro, J. G. (2006), “Assessment of the decrease of CO<sub>2</sub> emissions in the construction field through the selection of materials – Practical case studies of three houses of low environmental impact”, in *Building and Environment*, vol. 41, issue 7, pp. 902-909. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006) [Accessed 15 October 2020].

Gorgolewski, M. (2018), *Resource salvation – The Architecture of Reuse*, John Wiley & Sons, Hoboken,

Gosling, J., Naim, M., Sassi, P., Iosif, L. and Lark, R. (2008), “Flexible buildings for an adaptable and sustainable future”, in Dainty, A. (ed.), *Proceedings of 24th Annual ARCOM Conference, 1-3 September 2008, Cardiff (UK)*, Association of Researchers in Construction Management, pp. 115-124. [Online] Available at: [www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2008-115-124\\_Gosling\\_et\\_al.pdf](http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2008-115-124_Gosling_et_al.pdf) [Accessed 17 October 2020].

Hammond, G. P. and Jones, C. I. (2008), “Embodied energy and carbon in construction materials”, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, vol. 161, issue 2, pp. 87-98. [Online] Available at: [doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87](https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87) [Accessed 15 September 2020].

Islam, H., Zang, G., Setunge, S. and Bhuyan, M. A. (2016), “Life Cycle Assessment of Shipping Container Home – A Sustainable Construction”, in *Energy and Building*, vol. 128, pp. 673-685. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.002) [Accessed 15 October 2020].

Jiménez-Rivero, A. and García-Navarro, J. (2017a), “Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 167, pp. 1335-1344. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.068) [Accessed 15 October 2020].

Jiménez-Rivero, A. and García-Navarro, J. (2017b), “Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union”, in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 116, pp. 116-123. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.014](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.014) [Accessed 15 October 2020].

Kirchherr, J., Reike, D. and Hekkert, M. (2017),

“Conceptualizing the circular economy – An analysis of 114 definitions”, in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221-232. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005) [Accessed 15 October 2020].

Lacy, P. and Rutqvist, J. (2015), *Waste to Wealth – The Circular Economy Advantage*, Palgrave Macmillan, London.

Malmqvist, T., Nehasilova, M., Moncaster, A., Birgisdóttir, H., Nygaard Rasmussen, F., Houlihan Wiberg, A. and Potting, J. (2018), “Energy and Buildings Design and Construction Strategies for Reducing Embodied Impacts from Buildings – Case Study Analysis”, in *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 35-47. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.033](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.033) [Accessed 15 October 2020].

McDonough, W. and Braungart, M. (2013), *The Upcycle – Beyond Sustainability – Designing for Abundance*, North Point Press, USA.

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, USA.

McDonough, W. and Braungart, M. (1998), “The next Industrial Revolution”, in *The Atlantic Monthly*, October 1998 issue. [Online] Available at: [www.theatlantic.com/magazine/archive/1998/10/the-next-industrial-revolution/304695/](http://www.theatlantic.com/magazine/archive/1998/10/the-next-industrial-revolution/304695/) [Accessed 15 October 2020].

Minunno, R., O’Grady, T., Morrison, G. M. and Gruner, R. L. (2020), “Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices – A circular economy case study of a modular building”, in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 160, article 104855. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855) [Accessed 15 October 2020].

Niero, M., Negrelli, A. J., Hoffmeyer, S. B., Olsen, S. I. and Birkved, M. (2016), “Closing the loop for aluminium cans – Life cycle assessment of progression in cradle-to-cradle certification levels”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 126, pp. 352-362. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.122](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.122) [Accessed 15 October 2020].

Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), “Circular economy for the built environment – A research framework”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710-718. [Online] Available at: [dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055](https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055) [Accessed 15 October 2020].

Rasmussen, F. N., Birkved, M. and Birgisdóttir, H. (2019a), “Low-carbon design strategies for new residential buildings – Lessons from architectural practice”, in *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 16, issue 5, pp. 374-390. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/17452007.2020.1747385](https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1747385) [Accessed 15 October 2020].

Rasmussen, F. N., Birkved, M. and Birgisdóttir, H. (2019b), “Upcycling and Design for Disassembly – LCA of buildings employing circular design strategies”, in *IOP Conference Series – Earth and Environmental Science*, vol. 225, 012040. [Online] Available at: [doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040) [Accessed 15 October 2020].

Rasmussen, F. N., Malmqvist, T., Moncaster, A., Houlihan Wiberg, A. and Birgisdóttir, H. (2017), “Analysing methodological choices in calculation of embodied and GHG emissions from buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1487-1498. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.013](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.013) [Accessed 15 October 2020].

Sanchez, B. and Haas, C. (2018), “Capital project planning for a circular economy”, in *Construction Management and Economics*, vol. 36, issue 6, pp. 303-312. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/01446193.2018.1435895](https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1435895) [Accessed 17 October 2020].

Scalisi, F. and Sposito, 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.

Schmidt III, R. and Austin, S. A. (2016), *Adaptable Architecture – Theory and Practice*, Routledge, London.

Slaughter, E. S. (2001), “Design strategies to increase building flexibility”, in *Building Research and Information*, vol. 29, issue 3, pp. 208-217. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/09613210010027693](https://doi.org/10.1080/09613210010027693) [Accessed 17 October 2020].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2017), “Strumenti e materiali per la fabbricazione digitale in architettura | Instruments and materials for digital manufacturing in architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 143-151. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/1222017](https://doi.org/10.19229/2464-9309/1222017) [Accessed 17 October 2020].

Støa, E. (2012), “Adaptable Housing”, in Smith, S. J. (ed.), *International Encyclopedia of Housing and Home*, Elsevier, San Diego (CA), pp. 51-57.

Thomas, A., Menassa, C. C. and Kamat, V. R. (2016), “System Dynamics Framework to Study the Effect of Material Performance on a Building’s Lifecycle Energy Requirements”, in *Journal of Computing Civil Engineering*, vol. 30, issue 6, 04016034. [Online] Available at: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000601](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000601) [Accessed 17 October 2020].

Treloar, G. J., Love, P. E. D. and Holt, G. D. (2001), “Using national input/output data for embodied energy analysis of individual residential buildings”, in *Construction Management Economics*, vol. 19, issue 1, pp. 49-61. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/014461901452076](https://doi.org/10.1080/014461901452076) [Accessed 10 September 2020].

UN – General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: [www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E) [Accessed 15 October 2020].

Van Berkel, R., Fujita, T., Hashimoto, S. and Geng, Y. (2009), “Industrial and urban symbiosis in Japan – Analysis of the Eco-Town program 1997-2006”, in *Journal of Environmental Management*, vol. 90, issue 3, pp. 1544-1556. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.010](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.010) [Accessed 15 October 2020].

Vukotic, L., Fenner, R. A. and Symons, K. (2010), “Assessing embodied energy of building structural elements”, in *Engineering Sustainability*, vol. 163, issue 3, pp. 147-158. [Online] Available at: [doi.org/10.1680/en-su.2010.163.3.137](https://doi.org/10.1680/en-su.2010.163.3.137) [Accessed 17 October 2020].