

Paola Marrone, Ilaria Montella,
Dipartimento di Architettura, Università Roma Tre, Italia

paola.marrone@uniroma3.it
ilaria.montella@uniroma3.it

Abstract. La storia della leggerezza potrebbe raccontare non più solo di aeroplani e materiali a bassa densità, ma anche di una esigenza di dematerializzazione coerente con il controllo del consumo di risorse e delle emissioni di gas climalteranti (GHGs). Dall'Accordo di Parigi, le politiche per la neutralità carbonica si sono focalizzate inizialmente sulle azioni di mitigazione per l'efficienza energetica e sulle fonti *low-carbon*. Sebbene cruciali per l'industria dei materiali, altre strategie sul lato della domanda sono possibili per ridurre la produzione. Nell'ambito dell'economia circolare applicata all'ambiente costruito, la *Material Efficiency* (ME) costituisce un insieme di azioni per il *circular design* per le quali occorre reinventare funzioni, configurazioni e processi costruttivi.

Parole chiave: *Material Efficiency*; *Circular design*; Transizione circolare; Mitigazione; Adattamento.

Una domanda crescente di materiali "efficienti" Gli storici hanno classificato le società preistoriche secondo i materiali sviluppati e impiegati in quelle epoche. Non è altrettanto possibile oggi: nessun materiale riesce a rappresentare i progressi tecnologici nei settori più avanzati. Leghe e compositi sono progettati utilizzando quasi l'intera tabella periodica, in un campo sempre più ampio di proprietà utili per espanderne le potenzialità (Graedel *et al.*, 2015). La curva di Ashby, collegando lo sviluppo dei materiali all'evoluzione della civiltà, mette proprio in evidenza come, dagli ultimi decenni del secolo scorso, nuovi materiali soprattutto a bassa densità comincino a garantire concorrenziali prestazioni per unità di energia (Beukers and van Hinte, 2001). Così la ricerca sulle costruzioni leggere, sintesi tra forma, struttura e processo in epoche in cui la misura del peso massimo era funzione delle capacità di movimentazione e trasporto dell'uomo, riappare a partire dagli anni '50. La fine dell'energia e delle risorse a buon mercato spinge, infatti, per uno sviluppo senza precedenti di nuovi materiali e prodotti ottimizzati dal punto di vista dei costi, con quantità di materia sempre più ridotta ma sufficiente ad assolvere le funzioni attese.

Material Efficiency design strategies for the circular transition

Abstract. The history of lightness might not only recount aeroplanes and low-density materials, it might also speak of a need for dematerialisation consistent with the control of resource consumption and greenhouse gas (GHG) emissions. Following the Paris Agreement, carbon neutrality policies had initially focused on mitigation actions for energy efficiency and low-carbon sources. Although crucial for the materials industry, other strategies, especially on the demand side, are possible to reduce their production. In the context of the circular economy applied to the built environment, *Material Efficiency* (ME) constitutes a set of actions for circular design for which functions, configurations and construction processes need to be reinvented.

Keywords: Material efficiency; Circular design; Circular transition; Mitigation; Adaptation.

"Leggerezza" significa non solo scegliere materiali a bassa densità, ma soprattutto progettare oggetti e costruzioni efficienti affinché possano trasportare più energia possibile in rapporto alla loro densità. La storia della leggerezza racconta allora non solo di aeroplani e materiali compositi, ma anche di una crescente esigenza di dematerializzazione per un ambiente più sostenibile rispetto al consumo delle risorse.

Dal Rapporto sui limiti dello sviluppo (Meadows *et al.*, 1972) è sempre più importante comprendere la relazione tra crescita economica e uso delle risorse (Fig. 1) per individuare strategie mirate a mantenerne il consumo entro i limiti del pianeta e con l'obiettivo di dissociare la crescita demografica e del PIL dalla domanda di materiali (IRP, 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Acquisita la consapevolezza (IPCC, 2018) della relazione tra incremento della produzione di materiali ed emissioni di gas a effetto serra (GHGs)¹ (Fig. 2), l'attenzione si sposta sulle misure in grado di incidere anche sulla domanda². La transizione verso un'economia circolare, affidata a modelli imprenditoriali sostenibili, ma anche alla trasformazione dei modelli di consumo, è oggi per l'Europa "un modello di crescita rigenerativo" per ridurre il «consumo di risorse entro i limiti del pianeta, e dunque [...] la sua impronta dei consumi e raddoppiare la percentuale di utilizzo dei materiali circolari nel prossimo decennio» (CE, 2020a).

Dall'offerta alla domanda: verso nuove strategie progettuali

A partire dall'Accordo di Parigi, le politiche per la neutralità carbonica si sono focalizzate sulle azioni di mitigazione per l'efficienza energetica e d'implementazione delle fonti energetiche *low-carbon* che, sebbene cruciali per l'industria dei materiali -

A growing demand for "efficient" materials

Historians have classified prehistoric societies according to the materials developed and used in those eras. This is not the case today: no material manages to represent the technological advances in the most advanced fields. Alloys and composites are designed using almost the entire periodic table, in an ever-widening field of useful properties able to expand their potential (Graedel *et al.*, 2015).

The Ashby curve, linking the development of materials to the evolution of civilisation, highlights how, from the last decades of the 20th century, new materials, especially low-density ones, began to guarantee competitive performance per unit of energy (Beukers and van Hinte, 2001). Thus, research into lightweight constructions, a synthesis of form, structure and process in

times when the measurement of maximum weight was a function of mankind's ability to move and transport, reappears from the 1950s onwards.

The end of cheap energy and resources is driving an unprecedented development of new materials and products that are cost-optimised, using ever smaller amounts of material that are still sufficient to fulfil their intended functions. "Lightness" means not only choosing low-density materials, but above all designing efficient objects and constructions so that they can carry as much energy as possible in relation to their density. The history of lightness thus not only describes aeroplanes and composite materials, but also a growing need for dematerialisation for a more sustainable environment in terms of resource consumption.

Since the Limits to Growth Report

una delle maggiori fonti di emissione di GHGs durante il ciclo di vita di un edificio - costituiscono una soluzione parziale dal lato dell'offerta (Material Economics, 2018). C'è ormai un campo di ricerca emergente dedicato alle strategie che sul lato della domanda possono ridurre il bisogno di nuova produzione progettando i prodotti in modo da: ridurre o modificare la domanda di materia prima; aumentare quella di materiali a basso contenuto di carbonio; usare in modo più efficiente con meno materiale, con una vita utile più lunga e una maggiore efficienza in uso (IRP, 2020; Cheshire, 2016).

Un'interessante esperienza di *circular design* per un tostapane della *Agency of Design*³ ha mostrato gli esiti di tre diverse strategie progettuali, considerando sistemi ed elementi dal punto di vista della durata, modularità ed essenzialità del prodotto. Tre distinti prototipi - *Optimist*, *Pragmatist* e *Realist* - riflettono diversi rapporti tra forma, struttura e processo, lavorando sulla durabilità del prodotto; sviluppando un prodotto modulare e, infine, innovando con materiali e tecnologie *low carbon*, poco costosi, semplici da produrre e gestire nella dismissione (Fig. 3). Il tostapane *Optimist* affronta l'obsolescenza realizzando un robusto pezzo unico in alluminio pressofuso, riciclato e riciclabile, con meccanismi esterni e solo quattro bulloni sulla base per accedere all'interno ed eventualmente sganciare e sostituire gli elementi. Un contatore segna il numero di fette tostate per ricordare il tempo che è passato a chi continuerà ad utilizzarlo.

Il *Pragmatist* è un tostapane modulare, composto da *slot* agganciati in modo da poter essere sostituiti singolarmente in caso di non funzionamento. Ogni *slot* è sottile abbastanza per essere imbustato, inserito in una cassetta postale e spedito al produttore.

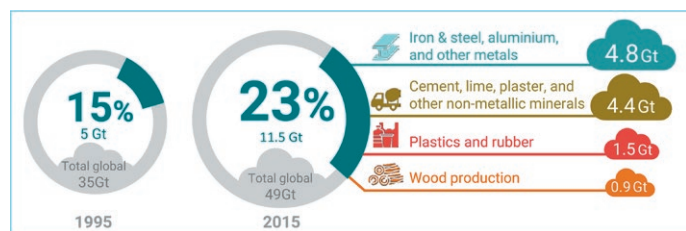
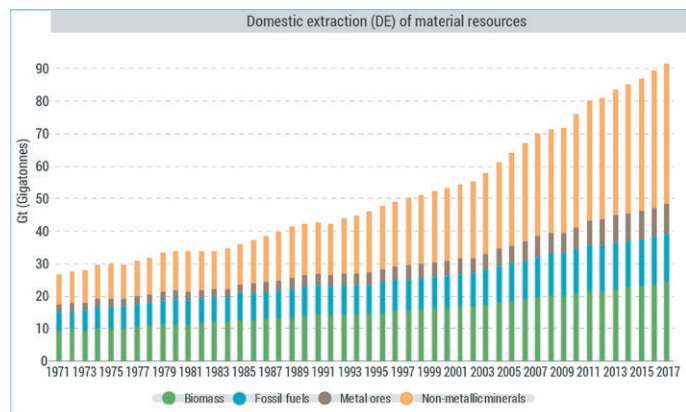
(Meadows *et al.*, 1972), it has become increasingly important to understand the relationship between economic growth and resource use (Fig. 1) in order to identify strategies aimed at keeping resource consumption within planetary limits and with the goal of decoupling population and GDP growth from material demand (IRP, 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Now that awareness has grown (IPCC, 2018) of the relationship between increased material production and greenhouse gas emissions (GHGs)¹ (Fig. 2), the focus has shifted to the need to identify measures that can also affect demand². The transition to a circular economy through sustainable business models, but also through the transformation of consumption patterns, is today for Europe "a regenerative growth model" «to reduce resource

consumption within the planet's limits, and thus [...] its consumption footprint and double the percentage of circular material use over the next decade» (EC, 2020a).

From supply to demand: towards new design strategies

Since the Paris Agreement, carbon neutrality policies have focused on mitigation actions for energy efficiency and implementation of low-carbon energy sources which, although crucial for the materials industry - one of the largest sources of GHGs emissions during a building's life cycle - are a partial supply-side solution (Material Economics, 2018). There is now an emerging field of research dedicated to strategies that can, on the demand side, reduce the need for new production by designing products to: reduce or change the demand for raw materi-



Il tostapane *Realist* può essere smontato separando facilmente i pezzi che lo compongono, senza rovinare o mischiare i materiali, attraverso una semplice invenzione tecnologica, ispirata ai processi di riciclo a secco⁴. Una pallina è posizionata in prossimità di un giunto che si apre a scatto quando la pallina si espande mettendo il tostapane in una camera sottovuoto. In questo modo, il tempo, e quindi il costo del lavoro dedicato allo smontaggio, è annullato restituendo valore ai materiali da riutilizzare.

Anche nel settore delle costruzioni esperienze riferibili alle tre strategie possono essere individuate, riferendosi ai requisiti già consolidati di manutenibilità, riparabilità, sostituibilità e durabilità, cui si aggiunge l'inversione della domanda di materia prima e l'attenzione alla sostenibilità in termini di ciclo di vita,

als; increase the demand for low-carbon materials; and be used more efficiently with less material, with a longer lifespan and greater efficiency in use (IRP, 2020; Cheshire, 2016).

An interesting circular design experience for a toaster by Agency of Design³ showed the results of three different design strategies, considering systems and elements from the point of view of durability, modularity and product essentiality. Three distinct prototypes - *Optimist*, *Pragmatist* and *Realist* - reflect different relationships between form, structure and process, working on the durability of the product, developing a modular product and, finally, innovating with low-carbon, low-cost materials and technologies that are easy to produce and manage during disposal (Fig. 3).

The *Optimist* toaster tackles obsolescence by making a sturdy one-piece re-

cycled and recyclable aluminium die-cast, with external mechanisms and only four bolts on the base to access the interior and unbolt and replace the elements, if necessary. A counter marks the number of toasted slices to remind those who continue to use it of the time that has passed.

The *Pragmatist* is a modular toaster, consisting of slots that are hooked together so that they can be replaced individually in the event of failure. Each slot is thin enough to be bagged, placed in a mailbox and shipped to the manufacturer.

The *Realist* toaster can be disassembled by easily separating its component parts without damaging or mixing materials through a simple technological invention inspired by dry recycling processes⁴. A ball is placed near a joint that snaps open when the ball expands, placing the toaster in a vacuum cham-

03 | Tre prototipi del Tostapane Optimist, Pragmatist e Realist, realizzati come esperienza di circular design, e con diverse strategie in termini di durata, modularità ed essenzialità. Il primo, affronta l'obsolescenza realizzando un pezzo unico in alluminio, con quattro bulloni per sostituire gli elementi; il secondo è modulare ed è composto da slot sostituibili singolarmente; il terzo, ispirato ai processi di riciclo a secco, è smontabile completamente grazie a un sistema a scatto. Fonte: The Agency of Design

Three distinct prototypes of toaster Optimist, Pragmatist and Realist, manufactured as an interesting circular design experience, with different strategies from the point of view of durability, modularity and product essentiality. The first one tackles obsolescence by making a one-piece aluminium, with four bolts to replace the elements; the second one is modular with slots that can be replaced individually; the third one, inspired by dry recycling processes, can be completely disassembled thanks to a snap open system. Source: The Agency of Design

energia inglobata e impronta ecologica. Progettare per prolungare la vita di un prodotto, renderlo leggero per consumare meno materiale e poterlo sostituire o prevedere come scomporlo facilmente per consentire il riciclo di materiali e componenti sono proprio alcune strategie della *Material Efficiency* (ME) che ampliano l'approccio circolare alla gestione delle risorse, perseguendo azioni più velocemente efficaci di quanto possa accadere sia con sostanziali innovazioni tecniche o investimenti su larga scala (IRP, 2020).

Strategie progettuali per la *Material Efficiency*

Se per la neutralità carbonica (CE, 2020b), è necessario intervenire drasticamente sulle emissioni industriali, oggi è altrettanto evidente che accanto a un'energia a emissioni zero, occorre intervenire sulla domanda per ottenere di più dai materiali che abbiamo già prodotto⁵, mettendo in atto le azioni necessarie alla transizione circolare (EC)⁶. Come emerge da studi sull'applicazione dei principi della EC all'ambiente costruito⁷ – guidati da importanti strutture di ricerca (Ellen MacArthur Foundation, 2019; Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015; Ramboll *et al.*, 2020; Material Economics, 2018) – le strategie ME individuano un ampio campo di azioni per la progettazione e costruzione degli edifici da esplorare sia nella loro efficacia sia nelle ricadute sui linguaggi costruttivi.

Queste strategie⁸ cercano di migliorare la dimensione ambientale e quella relativa alle risorse nella gestione dei rifiuti (le 3R), poco collegate alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Fig. 4), considerando azioni che interagiscono con l'emissione di gas serra. ME, mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, infatti, si condizionano reciprocamente: la produzione di mate-

riali è una delle principali cause di gas serra, ma i cambiamenti climatici incidono positivamente o negativamente sulla domanda di materiali (ad es. con stagioni di crescita degli alberi più lunghe o eventi climatici catastrofici)⁹.

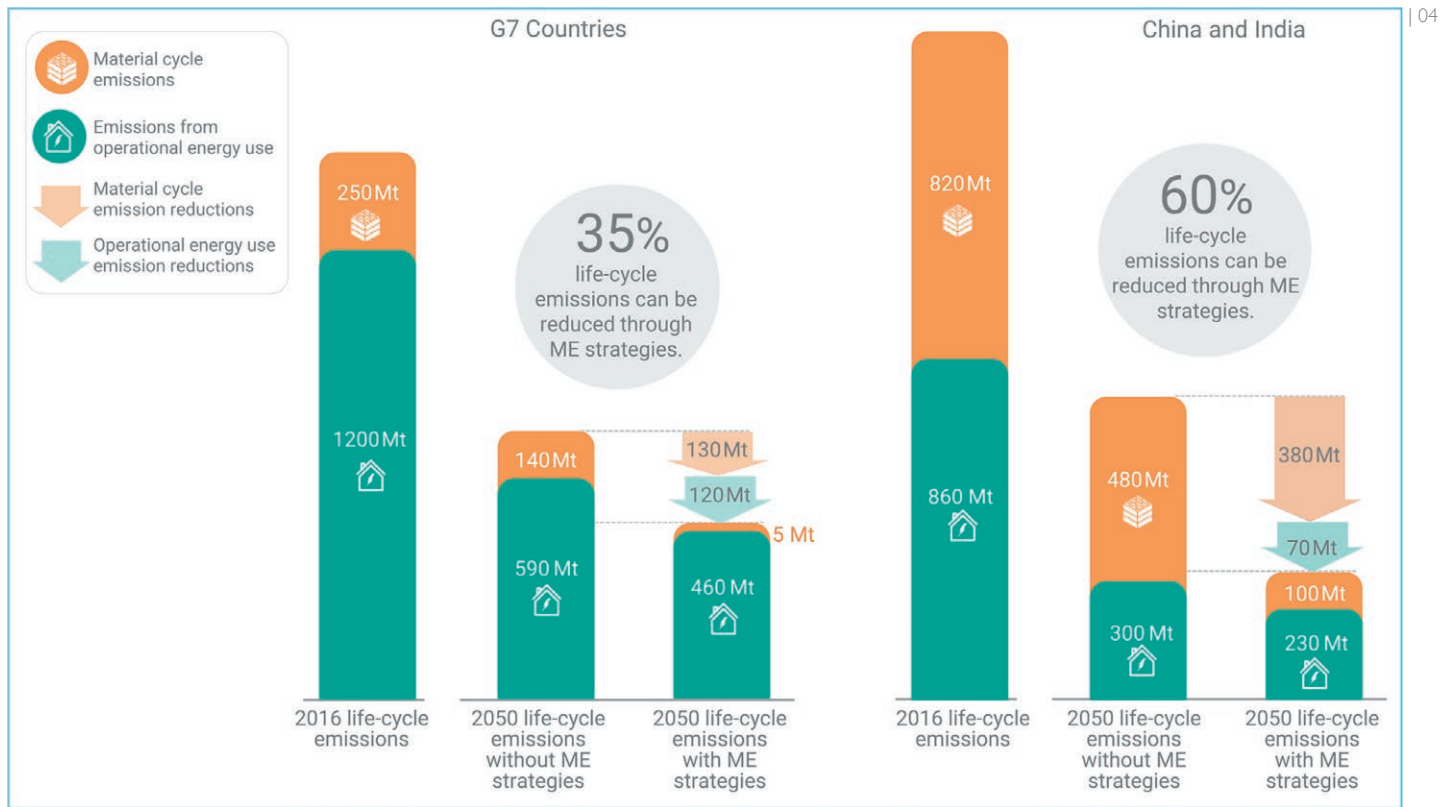
Le strategie di ME sono state definite nello studio dell'International Resource Panel per i Ministri dell'Ambiente del G7 di Bologna (IRP, 2020):

1. Progettare usando meno materia, grazie al design leggero, garantendo stesso funzionamento e ridotto consumo di energia in opera;
2. Sostituire i materiali, con quelli a minore intensità di carbonio¹⁰;
3. Migliorare la produttività, ottimizzando gli scarti nei processi di produzione e, di conseguenza, la domanda di materia prima;
4. Intensificare l'uso, di oggetti ed edifici, garantendo lo stesso servizio, ma ottimizzandone l'utilizzo grazie ad una progettazione più efficiente e multifunzionale o incentivando la condivisione;
5. Migliorare il recupero e il riciclo dei materiali a fine ciclo di vita, con attenzione alla quantità e qualità dei materiali secondari, per ridurre la materia prima¹¹;
6. Recuperare, rigenerare e riusare i componenti, anche attraverso la rigenerazione e la modularità, favorendo, ad esempio, il riuso di componenti strutturali quali le travi in acciaio¹²;
7. Prolungare la durata dei prodotti, con l'estensione della vita utile, anche attraverso la riparazione, la sostituzione, la rigenerazione¹³.

Se la riduzione della domanda di materie prime è una strada per ridurre il consumo di energia e l'emissione di gas serra, l'introdu-

03 |





zione di queste strategie vi concorre proponendo alcune azioni che richiedono, inevitabilmente, di includere nuove condizioni nel processo progettuale.

Un quadro di azioni per il progetto

Diversi studi, tra i più accreditati, sull'economia circolare applicata all'ambiente costruito si occupano direttamente o indirettamente di ME (Material Economics, 2018; IRP, 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2019;

ber. This eliminates the time, and, therefore, the cost of the work involved in disassembly, by restoring value to the materials to be reused. In the construction sector too, experiences of the three strategies can be identified, referring to the already consolidated requirements of maintainability, reparability, replaceability and durability, plus the reversal of demand for raw materials and attention to sustainability in terms of life cycle, energy input and ecological footprint. Designing to extend the life of a product, making it lightweight to consume less material and be able to replace it, or envisaging how to easily break it down to allow materials and components to be recycled are just some of the Material Efficiency (ME) strategies that extend the circular approach to resource management, pursuing actions faster than can be achieved with either sub-

stantial technical innovations or large-scale investments (IRP, 2020).

Design strategies for material efficiency

If, in order to achieve carbon neutrality (EC, 2020b), it is necessary to take drastic action on industrial emissions, it is now equally clear that, alongside zero-emission energy, we need to take action on the demand side to get more out of the materials we have already produced⁵ by implementing all the actions necessary for the circular transition (EC)⁶. As evidenced by studies on the application of EC principles to the built environment⁷ - guided by leading research structures (Ellen MacArthur Foundation, 2019; Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015; Ramboll, Fraunhofer ed Ecologic Institute 2020; Material Economics, 2018) - ME strategies can identify a wide range of ac-

Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015). Per metterli a confronto è stato elaborato un quadro comparativo (Fig. 5).

Material Economics (Material Economics, 2018) individua tre macro-categorie per migliorare l'uso dei materiali: *Recirculation of Materials*, *Buildings Materials Efficiency* e *Circular Business Models*. Per l'IRP (IRP, 2020) sono auspicabili le seguenti azioni: *Light weighting*, *More intensive use*, *Lifetime extension*, *Reuse*, *Recycling*.

MacArthur Foundation (2019) individua come campi d'azione:

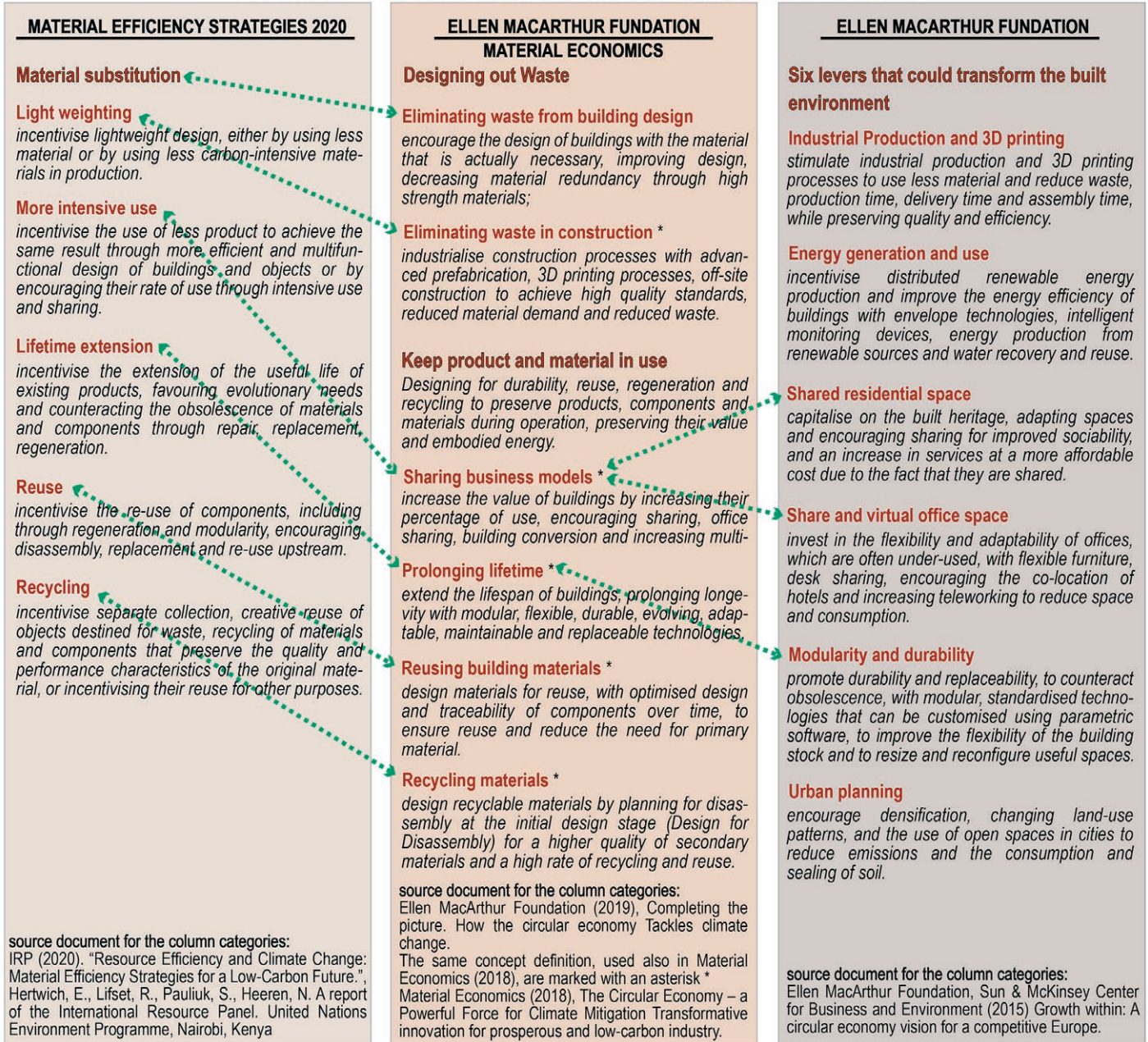
tions for the design and construction of buildings to be explored, both in terms of their efficacy and their impact on building languages.

These strategies⁸ seek to improve the environmental and resource dimensions of waste management (the 3Rs), which have little connection to climate change mitigation (Fig. 4), by considering actions that may interact with greenhouse gas emissions. ME, mitigation and adaptation to climate change, in fact, are mutually interrelated: the production of materials is one of the main causes of greenhouse gases, but climate change has a positive or negative impact on the demand for materials (e.g. longer tree growing seasons or catastrophic weather events)⁹.

ME strategies were defined and modelled in the International Resource Panel study for G7 Environment Ministers in Bologna (IRP, 2020):

1. Design using less material, thanks to lightweight design, ensuring the same operation and reduced energy consumption when being used;
2. Replace materials with those of lower carbon intensity¹⁰;
3. Improve productivity, optimise waste in production processes and, consequently, the demand for raw materials;
4. Intensify the use of objects and buildings, guaranteeing the same service, but optimising their use through more efficient and multi-functional design or encouraging their rate of use by sharing them with others;
5. Improve the recovery and recycling of end-of-life materials, paying attention to the quantity and quality of secondary materials to reduce raw material¹¹;
6. Recover, remanufacture and reuse

FRAMEWORK OF PROCESS AND PROJECT STRATEGIES



components, including through regeneration and modularity, e.g. by encouraging the reuse of structural components such as steel beams¹²;

7. Extend the lifetime of products by extending the useful lifetime of existing products, including through repair, replacement, regeneration¹³.

While reducing the demand for raw materials is one way to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions, the introduction of these strategies contributes to this by proposing certain actions that inevitably require new conditions to be included in the design process.

A framework of actions for the design

Several of the most reputable studies on the circular economy applied to the built environment deal directly or indirectly with ME (Material Economics, 2018; IRP, 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2019; Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015). In order to assess them, it was necessary to draw up a comparative framework which highlights affinities (Fig. 5).

Material Economics (Material Economics, 2018) identifies three macro-categories for improving the use of materials: recirculation of materials,

building materials' efficiency and circular business models. LIRP (IRP, 2020) considers the following actions to be desirable: light weighting, more intensive use, lifetime extension, reuse, recycling.

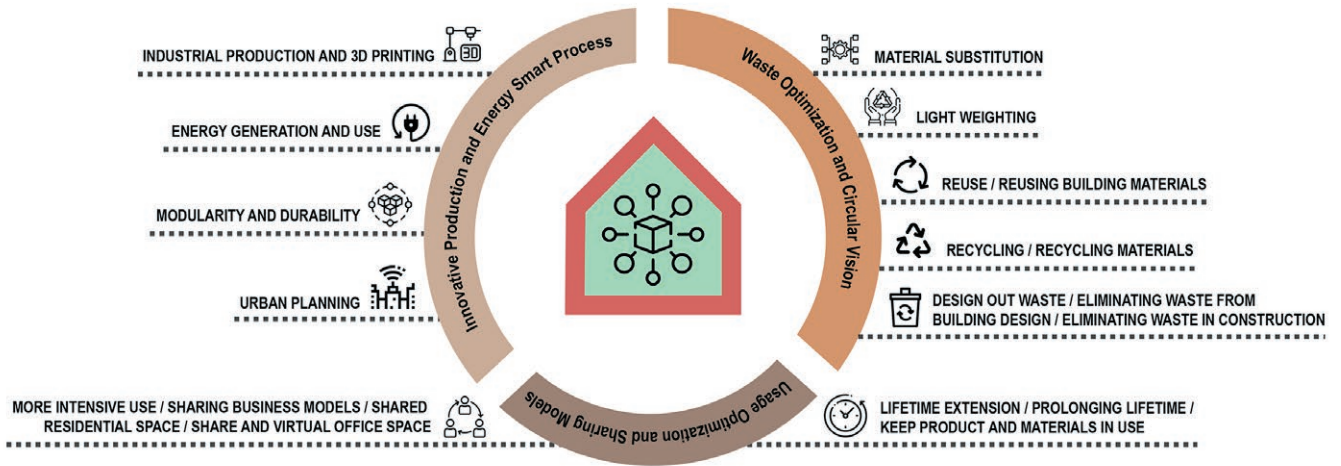
MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2019) identifies as fields of action:

- Design out waste, articulated in eliminating waste for building designs, eliminating waste in construction;
- Keep products and materials in use, articulated in sharing business models, prolonging lifetime, reusing building materials, recycling materials.

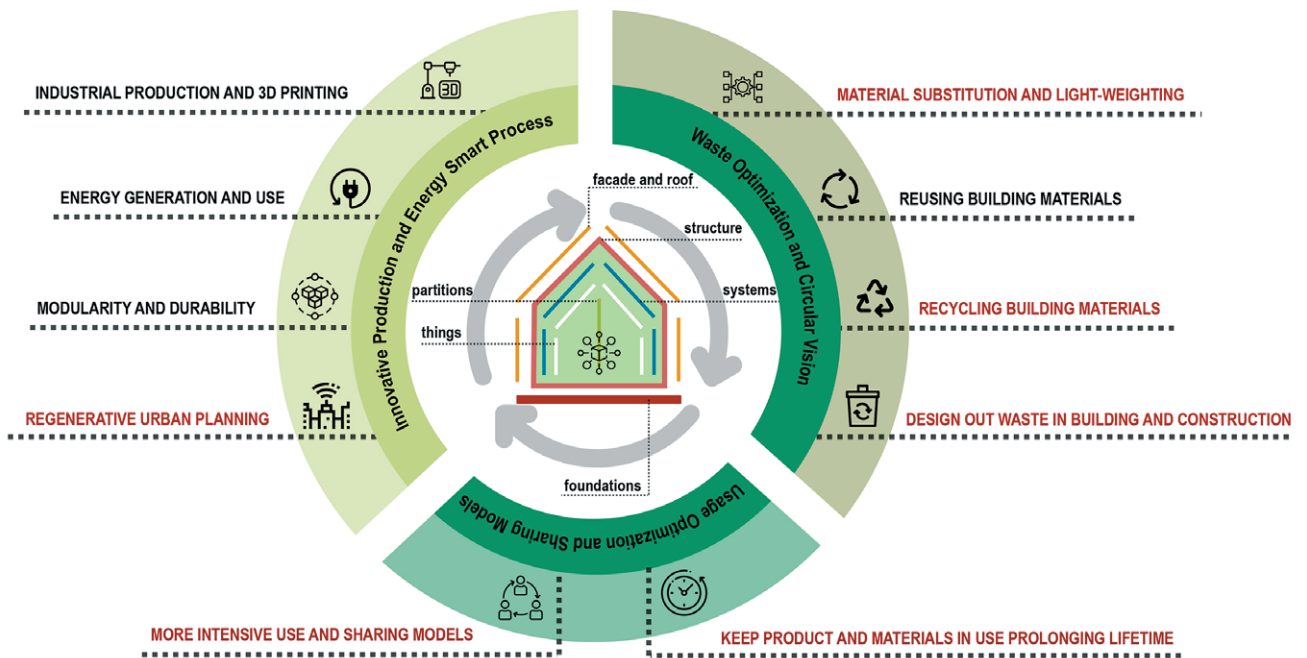
Finally, actions considered to be levers for the benefit of the ME were also added to the overall framework (Ellen MacArthur Foundation, Sun & McKinsey Centre for Business and Environment, 2015): industrial production and 3D printing, energy generation and use, shared residential space, share and virtual office space, modularity and durability, urban planning.

On the basis of this frame of reference, correspondences have been identified for related themes in three macro areas: waste optimisation and circular vision, innovative production and energy smart process and usage optimi-

SYNERGY BETWEEN STRATEGIES



FROM ACTION TO PROJECT



sation and sharing models (Fig. 6). Through the synthesis of the themes and voices reported in the studies, an original proposal of strategies has been drawn up, in which design and process actions are framed according to a circular design vision, useful for monitoring and comparing experiences with their outcomes in functional and figurative terms (Fig. 7).

From actions to projects: considerations on good practice and formal paradigms

In recent years, the world of design and construction has initiated many

experiences inspired by circular design principles. Starting from the proposed thematic organisation of strategies illustrated in Figure 7, a number of case studies have been selected as practical experiments of the theoretical principles of ME, circular design, Design for Disassembly (Fig. 8).

In particular, projects were identified that applied the Buildings As Material Banks methodology, with material traceability thanks to the material passport (BAMB, 2015), with a focus on the protocol for reversible buildings (Reversible Building Design Guidelines and Protocol) (Durmisevic, 2018)

and implemented designs (Kasper and Sommer, 2019) following the circular building approach and the principles of Design for Disassembly¹⁴ (ISO, 2020). Two considerations can be drawn from the case studies. The first one concerns how, for new buildings and the renovation of existing ones, it is possible to introduce ME strategies, starting with the design phase, that are related to concepts of durability, adaptability, disassembly, replacement, reuse of structural components, recycling, standardisation, improvement of construction technologies, digitisation of construction processes, sharing of

spaces in order to reduce built-up areas and to intensify their use. In particular, some good practices call for:

- encouraging assembly and disassembly so that they are practicable even by unqualified personnel, such as users themselves;
- endowing materials with *material passports* for traceability over time by involving companies and research centres;
- designing by configuring functional modules that allow distribution flexibility and usage change;
- raising user awareness to reverse demand by spreading knowledge

| CASE STUDIES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------|-------------------------------------------|------|----------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|----------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Number | Picture | Name | Type | Function | Location | Focus | INNOVATIVE PRODUCTION AND ENERGY SMART PROCESS | | | USAGE OPTIMIZATION AND SHARING MODELS | | WASTE OPTIMIZATION AND CIRCULAR VISION | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | Build Reversible In Conception (B.R.I.C.) | N | O | BG | A convertible building made of wood, scalable, reversible, with optimisation of waste, assembled and disassembled by students, and with a change in purpose (offices, shops, acoustic laboratory). | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | Reversible Experience Modules (REMS) | N | E | BG | Reversible and adaptable exhibition space promoting the use of the Material Passports Platform by showing seventy products and systems designed for reuse, recycling in circular buildings. | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | Circular Retrofit Lab (CRL) | R | E | BE-UK -NL | Renovation of an existing building, with modules for various uses and student housing. The project takes into account the principles of reversibility, replicability, attention to waste reduction, reconfiguration of functional | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | Green Transformable Building LAB (GTBL) | N | M | NL | New construction with a modular steel structure made with interchangeable components, experimenting with changing shapes and uses, using Reversible Building Design protocols. | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | New Office Building | N | O | DE | Pilot project for a transformable and recyclable office building, built on Cradle to Cradle principles, using natural materials and the Material Passport to track the materials used over time. | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | Circularity Lab | N | E | USA | A prototype that expresses the opportunities and challenges of circular design by demonstrating the principles of DID, the innovation of materials and technological solutions. In addition, the project launched a call for companies and research centres to propose circular products and materials to construct the building. | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | Circle House | N | E | DK | A building of 60 social housing units, built on circular principles allowing the building to be dismantled, with 90% reuse of materials. In addition, the project has brought together over thirty Danish companies to develop and use circular products. | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | The London Aquatics Centre | N | S | UK | Temporary sports structure designed according to DID principles, with a lightweight structure that can be easily dismantled after the Olympic Games. | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | 3XN Architects Offices | R | O | DK | Following a fire, a new portion of the building was constructed leaving only a few structural elements. The sheds were rebuilt using traditional joints and exposed systems and following many DID principles. | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | Bullitt Center | N | O | USA | The structure is made of wood, concrete and steel, used separately according to the principles of structural material optimisation to reduce carbon emissions. | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | Alliander HQ | R | O | NL | Renovation and extension of an office building, the first circular building in the Netherlands, equipped with a Material Passport that quantifies all contained materials, new and existing. | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | Technical Nutrient Pavilion | N | E | NL | A building created with DID principles and following the Cradle to Cradle® strategic framework, used to showcase innovative solutions and recyclable or reusable materials. The building is realised in collaboration with 41 companies that produce Cradle to Cradle® certified products. | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | WikiHouse | N | HS | UK | Digitally produced building system, with 80% reusable materials, allowing users to quickly design, manufacture and assemble the house, which can be customised and printed by local companies using numerically controlled printing techniques. | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | Mining and Recycling (UMAR) | N | O | UK | An experimental unit that takes a responsible approach to resource use by using reusable, recyclable or compostable materials, tracked through their life cycle. The building adopts a modular approach, with reusable wooden structures and facades, it is prefabricated, with structures that can be separated during disassembly, thus reducing waste. | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | Martini Hospital | N | HO | NL | Example of IFD (Industrialised - Flexible - Demountable) design based on standardisation, prefabrication and flexibility that allows the walls to be dismantled, the space reconfigured and extensive blocks added to the façade to increase the surface area. | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | Villa Zebra / Nutcracker / Camera | N | M | NL | A building with three lives because it was initially built as a cultural space for children, then dismantled and reassembled as a school for eight classes, then disassembled and reassembled by distributing it in three other | | | | | | | | | | | | | |

N: new construction R: renovation HS: house HO: hospital E: exhibition S: stadium MF: multifunctional O: office

about products designed for reuse and recycling in circular buildings;

- designing by favouring the interchangeability of elements and by experimenting with changing forms and uses thanks to the protocol for reversible buildings;
- designing for separability of elements and accurate production with standardisation and prefabrication driven by modular approaches;
- also applying these virtuous principles for circular buildings in renovations, aiming for reversibility, replicability, reduction of waste, extension of useful lifetime;
- adopting the *Cradle to Cradle*® principles for regenerative design;
- encouraging digital production to enable remote customisation and 3D printing by local companies.

The second consideration concerns the extent to which ME is able to influence

building languages. The history of architecture bears witness to how new materials and innovations in production and construction technologies have pushed the architect's creativity to experiment with their potential. The verification of the structural qualities of cast iron and the possibility of producing extruded iron from the end of the 18th century onwards gave rise to the architecture of large glass spaces. In the same way, the discovery of reinforced concrete and the many innovations of traditional materials have given us, for example, the architecture of Perret, the structures of Maillart or Nervi, Candela and Torroja, the "bioclimatic" experiments of Foster and Herzog, up to the research on the different use of traditional or innovative materials of Zumthor, Perraudin, Shigeru Ban or Herzog and de Meuron or Zaha Hadid.

The same does not seem to have happened in the building experimentation of circular solutions, even in the experiments of careful architects whose achievements rather resemble a full-scale catalogue of re-cycled materials. If the experiences represent, with their good practices, a useful test for the effectiveness of strategies and related actions that can be pursued at different levels of the building process, in general, most of them have focused on the transformation of the innovative product process and investment in new manufacturing processes. In the various languages of these experiences, it is possible to recognise the tradition of prefabrication with the scanning of its components and joints or the modules of post-disaster building production, rather than autonomous research into new resistant and light, sustainable and safe materials which, as has often hap-

pened, other more advanced sectors have brought to architecture.

Conclusions

Materials have shaped the evolution of civilisations, but today, new environmental and economic issues are transforming industries and their products. Faced with the consequences of GHG emissions and the scarcity of raw materials, the use of local resources will intensify and it will become increasingly necessary to recover, reuse or recycle already available materials. A "regenerative growth model" is emerging for the next decade in order to reduce the consumer footprint and increase the use of circular materials. While trying to reduce new raw materials, we are heading towards an increasing availability of a variety of reusable materials and components for which it will be necessary to reinvent functions,

- *Design out Waste*, articolato in *Eliminating waste for building designs, Eliminating waste in construction*;
- *Keep Products and Materials in Use*, articolato in *Sharing business model, Prolonging lifetime, Reusing building materials, Recycling materials*.

Infine, nel quadro complessivo sono state aggiunte anche le azioni considerate leve a vantaggio della ME (Ellen MacArthur Foundation, *et.al.*, 2015): *Industrial Production and 3D printing, Energy generation and use, Shared residential space, Share and virtual office space, Modularity and durability, Urban planning*.

Sulla base di questo quadro, sono state individuate corrispondenze per tematiche affini riconducibili a tre macro-ambiti: *Waste Optimization and Circular Vision, Innovative Production and Energy Smart Process e Usage Optimization and Sharing Models* (Fig. 6).

Attraverso la sintesi tra tematiche e voci riportate negli studi è stata elaborata una proposta originale di strategie, in cui si collocano azioni progettuali e processuali secondo una visione di *circular design*, utili a monitorare e confrontare esperienze con i loro esiti in termini funzionali e figurativi (Fig. 7).

Dalle azioni ai progetti: considerazioni su buone pratiche e paradigmi formali

Negli ultimi anni il mondo della progettazione e della costruzione ha avviato molte esperienze ispirate ai principi del *Circular Design*. Partendo dall'organizzazione delle strategie elaborata in figura 7, sono stati selezionati casi studio di ME, *Circular Design, Design for Disassembly* (Fig. 8).

In particolare, sono stati individuati progetti riferibili alle metodologie *Buildings As Material Banks*, con tracciabilità dei mate-

configurations and construction processes by designing solutions to extend their lifetime, make them light so as to consume less material or break them down easily to allow recycling.

In this direction and in the design of the built environment, various Material Efficiency strategies are being consolidated through a number of best practice experiences that show how the scenarios under way have repercussions on languages yet to be explored.

Despite the fact that for years there has been a gradual transition towards more sustainable architecture, traced in its life cycle and measured in the energy incorporated, new formal paradigms are emerging with the task of expressing how architecture, which has always been 'material' and destined to last, is overturning its relationship with duration and time.

Each project will become a new prototype that the architect will have to configure, with the know-how of a craftsman, even reinventing the means of access to the material, so that architecture is prepared to be 'regenerated' in harmony with the processes of nature.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper concerns theoretical contents and partial results related to the PRIN 2017 research project: *TECH-START-key enabling TECHNOlogies and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation*.

NOTES

¹ In 2017, the production of materials, constructions and operations of buildings accounted for 36% of global energy end-use and 39% of energy-related

CO₂ emissions (Ramboll *et al.*, 2020).

² According to *Material Economics* (2019), the debate on GHG emissions from steel, cement and other chemical producing industries has focused on supply-side measures, neglecting those that can affect demand through circular processes.

- favorire il montaggio e lo smontaggio affinché siano praticabili anche da personale non qualificato come gli stessi utenti;
- dotare i materiali di *Material Passport* per la tracciabilità nel tempo coinvolgendo aziende e centri di ricerca;
- progettare moduli funzionali per la flessibilità distributiva e di funzione;
- sensibilizzare l'utenza per invertire la domanda con la conoscenza su prodotti per il riuso e il riciclo in edifici circolari;
- favorire l'intercambiabilità degli elementi sperimentando forme e usi grazie al protocollo per edifici reversibili;
- progettare mirando alla separabilità degli elementi e a una produzione accurata con standardizzazione e prefabbricazione spinte dagli approcci modulari;
- applicare i principi per edifici circolari anche nelle ristrutturazioni, puntando a reversibilità, replicabilità, riduzione dei rifiuti, allungamento della vita utile;
- adottare i principi di *Cradle to Cradle*[®] per una progettazione rigenerativa;

³ Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/designing-for-a-circular-economy-has-more-than-one-solution>

⁴ The polymers in the waste products are separated through optical recognition and sorted using air jets.

⁵ About 15% of total building emissions depend on materials and construction, even in countries where electricity and heating are low carbon (Material Economics, 2018).

⁶ According to a definition that goes beyond that limited to the reuse or regeneration of materials, CE is based

on three principles: preserving and improving natural capital; optimising resources; promoting system effectiveness. These three principles lead to six actions of the ReSOLVE scheme (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015).

⁷ A CE action reduces the use of materials (ME); replaces high-impact materials with low-emission ones; activates the re-circulation of products and materials (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015).

⁸ According to the Royal Society, ME is "the pursuit of technical strategies, business models, consumer preferences, and policy instruments that would lead to a substantial reduction in the production of high-volume, energy-intensive materials required to deliver human well-being". ME is part of resource efficiency (RE) which includes other resources (IRP, 2020).

- incentivare una produzione digitale per la customizzazione e la stampa 3D in remoto da aziende locali.

La seconda considerazione riguarda, invece, quanto la ME incida sui linguaggi costruttivi. La storia dell'architettura testimonia come nuovi materiali e innovazioni nelle tecnologie di produzione e costruzione abbiano spinto la creatività dell'architetto a sperimentarne le potenzialità. Dalla verifica delle qualità strutturali della ghisa, e dalle possibilità di produrre estrusi di ferro a partire dalla fine del '700, nasce l'architettura dei grandi spazi vetrati; così come, la scoperta del cemento armato e le tante innovazioni di materiali anche tradizionali ci hanno regalato, ad esempio, le architetture di Perret, le strutture di Maillart o di Nervi, Candela e Torroja, le sperimentazioni "bioclimatiche" di Foster e T. Herzog, fino alle ricerche sull'uso diverso di materiali tradizionali o innovativi di Zumthor, Perraudin, Shigeru Ban o Herzog & de Meuron o Zaha Hadid.

Ugualmente non sembra accadere nelle sperimentazioni di architetti attenti le cui realizzazioni assomigliano piuttosto a un catalogo in scala 1:1 di materiali di riciclo. Se le esperienze rappresentano un utile test per l'efficacia delle strategie e delle relative azioni perseguibili a diverso livello del processo edilizio, in generale, la maggior parte di esse si è concentrata sulla trasformazione del processo di innovazione dei prodotti e sull'investimento nei nuovi processi manifatturieri. Nei variegati linguaggi di queste esperienze è riconoscibile la tradizione della prefabbricazione con la scansione dei suoi componenti e giunti o dei moduli della produzione edilizia post-catastrofe, piuttosto che una ricerca autonoma sui nuovi materiali resistenti e leggeri, sostenibili e sicuri che, come spesso è accaduto, altri settori più avanzati hanno proposto all'architettura.

⁹ Mitigation and adaptation involve an increase in the use of materials. Technologies for low-carbon electricity production require large amounts of uncommon materials compared to fossil sources; equally, adaptation measures for the reconstruction or protection of coastal areas, civil infrastructure or the built environment (IRP, 2020).

¹⁰ Wood is advantageous because of the storage of CO₂, which delays oxidation, but also because of the lower energy expenditure in production.

¹¹ Demolition waste accounts for about one third of solid waste in Europe. However, the incentive to recycle it is hampered by low performance characteristics.

¹² Reuse allows significant CO₂ savings, extends product life and avoids the energy consumption of recycling processes with modular constructions, designed for disassembly-replace-

ment-reuse; labelling and traceability of components.

¹³ It is desirable to encourage the evolutionary needs of buildings, extending their useful life by counteracting the obsolescence of materials and components and providing procedures for replacing or repairing.

¹⁴ Design for Disassembly integrates the principles of disassembly, adaptability, maintainability, replacement, reuse, recycling and disposal, and facilitates disassembly at end-of-life in order to reuse, recycle, recover and preserve resources, time, costs, energy and materials (ISO 20887:2020en).

Conclusioni

La materia ha segnato l'evoluzione delle civiltà, ma oggi nuove questioni che riguardano l'ambiente e l'economia stanno trasformando i settori industriali e i loro prodotti. Di fronte alle conseguenze delle emissioni di GHGs e alla scarsità di materie prime, l'uso delle risorse locali si intensificherà e diventerà sempre più necessario recuperare, riusare o riciclare materiali già disponibili. Per il prossimo decennio si delinea "un modello di crescita rigenerativo" necessario a ridurre l'impronta dei consumi e aumentare l'utilizzo dei materiali circolari.

Mentre si cerca di ridurre la nuova materia prima, ci si avvia verso una crescente disponibilità di una varietà di materiali e componenti di ri-utilizzo per i quali sarà necessario reinventare funzioni, configurazioni e processi costruttivi, progettando soluzioni per prolungarne la vita, renderli leggeri per consumare meno materiale o scomporli facilmente per consentirne il riciclo. In questa direzione e nella progettazione dell'ambiente costruito, varie strategie di *Material Efficiency*, si stanno consolidando attraverso esperienze di buone pratiche che testimoniano come gli scenari in atto abbiano ricadute sui linguaggi ancora tutte da esplorare.

Nonostante da anni sia in atto una graduale transizione verso un'architettura più sostenibile, tracciata nel ciclo di vita e misurata nell'energia inglobata, nuovi paradigmi formali si delinearanno con il compito di esprimersi su come nell'architettura, da sempre 'materica' e destinata a durare, si stia ribaltando il rapporto con la durata e il tempo.

Ogni progetto diventerà un nuovo prototipo che l'architetto dovrà riuscire a configurare, con il know-how di un artigiano, reinventando anche i mezzi di accesso alla materia, affinché l'architettura si disponga ad essere 'rigenerata' in sintonia con i processi della natura.

RINGRAZIAMENTI

L'articolo riguarda contenuti teorici ed esiti parziali relativi alla ricerca PRIN 2017, progetto: *TECH-START-key enabling TECHNOlogies and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation.*

NOTE

¹ Nel 2017 produzione dei materiali, costruzione e funzionamento degli edifici rappresentano il 36% degli usi finali di energia a livello globale e il 39% delle emissioni CO₂ relative all'energia. (Ramboll *et al.*, 2020).

² Secondo *Material Economics* (2019) il dibattito sulle emissioni di GHGs delle industrie produttrici di acciaio, cemento e altre sostanze chimiche ha riguardato le misure relative all'offerta, trascurando quelle in grado di incidere sulla domanda con processi circolari.

³ Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/designing-for-a-circular-economy-has-more-than-one-solution>.

⁴I polimeri nei prodotti di scarto sono separati con il riconoscimento ottico e getti d'aria.

⁵Circa un 15% delle emissioni totali degli edifici dipende dai materiali e dalla costruzione, anche nei paesi in cui elettricità e riscaldamento sono *low-carbon* (Material Economics, 2018).

⁶L'EC si basa su tre principi: preservare e migliorare il capitale naturale; ottimizzare le risorse; favorire l'efficacia del sistema; da questi scaturiscono sei azioni dello schema ReSOLVE (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015).

⁷Un'azione di EC riduce l'uso di materiali (ME); sostituisce materiali ad alto impatto con quelli a basse emissioni; attiva la ri-circolazione di prodotti e materiali (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015).

⁸Per la Royal Society la ME – parte della *Resource efficiency* (RE) che include altre risorse (IRP, 2020) – è «*the pursuit of technical strategies, business models, consumer preferences, and policy instruments that would lead to a substantial reduction in the production of high-volume, energy-intensive materials required to deliver human wellbeing*».

⁹Mitigazione e adattamento comportano un aumento nell'uso dei materiali. Le tecnologie per la produzione *low-carbon* di elettricità richiedono grandi quantità di materiali non comuni rispetto alle fonti fossili; ugualmente, gli interventi di adattamento per la ricostruzione o protezione delle aree costiere, infrastrutture civili o dell'ambiente costruito (IRP, 2020).

¹⁰Il legno è vantaggioso per lo stoccaggio di CO₂, che ne ritarda l'ossidazione, ma anche per il minore dispendio energetico in produzione.

¹¹I rifiuti da demolizione sono circa un terzo dei rifiuti solidi in Europa.

¹²Il riuso consente un risparmio di CO₂, allunga la vita utile del prodotto ed evita il dispendio energetico dei processi di riciclo con costruzioni modulari, predisposte per disassemblaggio-sostituzione-riutilizzo; etichettatura e tracciabilità dei componenti.

¹³È auspicabile favorire le esigenze evolutive degli edifici, allungandone la vita utile, contrastando l'obsolescenza dei materiali e componenti, con procedure di sostituzione o riparazione.

¹⁴*Design for Disassembly* integra i principi di smontabilità, adattabilità, manutenibilità, sostituzione, riuso, riciclo, smaltimento, facilita lo smontaggio a fine vita per riutilizzare, riciclare, recuperare e salvaguardare le risorse, di tempo, costi, energia e materiali (ISO, 2020).

REFERENCES

BAMB (2015), "Horizon 2020 EU-funded project BAMB – Buildings as Material Banks", available at: <https://cordis.europa.eu/event/id/146302-sbe19-brussels-bambcircpathbuildings-as-material-banks-a-pathway-for-a-circular-future/it> (accessed 02 March 2021).

Beukers, A. and Van Hinte (2001) *Lightness. The inevitable renaissance of minimum energy structures*, 010 publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Cheshire, D. (2016), *Building Revolutions. Applying the circular economy to the built environment*, RIBA Publishing, London, United Kingdom.

Commissione Europea (2020a), "Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare. Per un'Europa più pulita e più competitiva, COM/2020/98 final", available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098> (accessed 02 March 2021).

Commissione Europea (2020b), "Il Green Deal europeo, COM/2019/640 final", available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (accessed 2 March 2021).

Durmisevic, E. (2018), "Reversible Building Design Guidelines and Protocol, WP3, Reversible Building design guidelines, Report Code: WP3|10|UT", available at: <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf> (accessed 2 March 2021).

Ellen MacArthur Foundation (2019), "Completing the picture. How the circular economy Tackles climate change", available at: <https://www.ellen-macarthurfoundation.org/publications/completing-the-picture-climate-change> (accessed 2 March 2021).

Ellen MacArthur Foundation, Sun and McKinsey Center for Business and Environment (2015), "Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe", available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe> (accessed 2 March 2021).

Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T. and Reck, B.K. (2015), "On the materials basis of modern society", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 112, pp. 6295-6300.

IPCC (2018), *Global warming of 1.5° C Special Report*, Geneva, Switzerland.

IRP (2020), "Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future", Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S. and Heeren, N. (Eds), United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

ISO (2020), ISO 20887:2020(en), "Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability – Principles, requirements and guidance", available at: <https://www.iso.org/obp/ui?iso:std:iso:20887:ed-1:v1:en>, (accessed 2 March 2021).

Kasper, G.J. and Sommer, J. (2019), "Building a Circular Future – 3rd Edition", available at: <http://www.buildingacircularfuture.com/about>, (accessed 2 March 2021).

Material Economics (2018), "The Circular Economy – a Powerful Force for Climate Mitigation Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry", available at: <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1> (accessed 2 March 2021).

Material Economics (2019), "Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry", available at: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050> (accessed 2 March 2021).

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens III, W.W. (1972), *The Limits to Growth*, Potomac Associates, Universe Books, Virginia, United State.

Ramboll, Fraunhofer and Ecologic Institute (2020), "The decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions", available at: <https://de.ramboll.com/-/media/files/rm/rapporteur/methodology-and-analysis-of-decarbonization-benefits-of-sectoral-circular-economy-actions-17032020-f.pdf?la=de> (accessed 2 March 2021).