

Monica Lavagna<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1001-4292>

Serena Giorgi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-9255-1197>

Daniela Pimponi<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-8747-7455>

Andrea Porcari<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7550-7805>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

<sup>2</sup> AIRI Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, Roma, Italia

monica.lavagna@polimi.it

serena.giorgi@polimi.it

daniela.pimponi@airi.it

andrea.porcari@airi.it

**Abstract.** Le Tecnologie Abilitanti hanno il potenziale per trasformare da un lato i flussi fisici di materiali e risorse (modalità di produzione e costruzione), dall'altro le relazioni immateriali di tipo organizzativo e gestionale (scambio e monitoraggio di dati e relazioni lungo l'intera catena del valore). Per questo sono da considerare rilevanti nel supportare i processi di cambiamento finalizzati all'uso circolare delle risorse. L'articolo presenta alcune ricerche e sperimentazioni, a livello europeo e italiano, volte allo sviluppo e applicazione di Tecnologie Abilitanti per l'economia circolare e al loro allineamento ai bisogni e sfide della società, attraverso il coinvolgimento diretto di attori dell'ecosistema del settore edilizio in momenti di confronto e di co-creazione per determinare potenziali strategie e azioni operative per l'innovazione del settore.

**Parole chiave:** Tecnologie digitali; Economia circolare; Settore delle costruzioni; Co-creazione; Coinvolgimento stakeholder.

## Introduzione

Il ripensamento del modello economico lineare nella direzione dell'economia circolare, al fine di garantire un uso appropriato delle risorse non solo energetiche ma soprattutto materiche, richiede di innovare i processi di produzione e consumo e le correlate tecnologie, sia di tipo "hard" (fisiche) sia di tipo "soft" (gestionali).

Da un lato occorre superare alcune rigidità tipiche delle attuali tecnologie produttive e costruttive che caratterizzano il settore edilizio (ragionando anche sulle tecnologie per la decostruzione dell'edificio e la rilavorazione dei suoi componenti a fine vita), dall'altro occorre attivare nuovi modelli organizzativi e gestionali (e di business) basati su innovativi strumenti e relazioni tra operatori, correlati all'intero ciclo di vita delle risorse (nella

prospettiva dell'estensione della responsabilità del produttore, del prodotto-servizio, ecc.). Questo significa in particolare favorire il dialogo tra operatori in ambiti differenti (approvvigionamento, produzione, distribuzione, installazione, manutenzione, disassemblaggio, logistica inversa, remanufacturing/riuso, ecc.), la gestione delle informazioni sui flussi materici di risorse lungo l'intera filiera, la sinergia con altre filiere produttive in un'ottica di prossimità di risorse, di integrazione di servizi e di circolarità.

## Individuazione delle Tecnologie Abilitanti per l'economia circolare

Molteplici sono le Tecnologie Abilitanti di supporto a questi percorsi di transizione<sup>1</sup>. Un primo raggruppamento riguarda le tecnologie "soft" digitali (Chauhan *et al.*, 2022), il cui supporto consiste nel raccogliere e mettere in rete tra operatori le informazioni nel tempo. Il monitoraggio di dette informazioni nell'intero ciclo di vita costituisce un importante tassello conoscitivo a supporto di analisi predittive e progettuali per il riuso, creando dunque una "circolarità" delle informazioni (informazioni su uso/disassemblaggio/fine vita/riuso a supporto di successive attività di progettazione e produzione). Occorrono strumenti di gestione (*data storage, analysis and sharing*) che facilitino la raccolta dei dati lungo il ciclo di vita delle risorse, lo scambio di dati in tempo reale e la disponibilità e fruibilità di dati relativi al monitoraggio dei cicli di vita di prodotti/pro-

## Enabling technologies for circular economy in the construction sector

**Abstract.** Enabling Technologies have the potential to transform both the physical flow of materials and resources (production and construction methods), and the intangible organisational and managerial relationships (exchange and monitoring of data and relationships along the entire chain of value). They should, therefore, be considered important in supporting change processes aimed at the circular use of resources. This paper presents some research and experiments, at European and Italian level, aimed at developing and applying Enabling Technologies for circular economy, and at aligning them with the needs and challenges of society, by directly involving actors of the building sector ecosystem in moments of discussion and co-creation to define potential strategies and operational actions for innovation in the sector.

**Keywords:** Digital technologies; Circular economy; Construction sector; Co-creation; Stakeholder engagement.

## Introduction

Rethinking the linear economic model in terms of circular economy, to guarantee an appropriate use of resources, such as energy and above all materials, requires innovating the production and consumption processes and the related technologies, both of the "hard" type (physical) and of the "soft" type (management).

On the one hand, some rigidities typical of current production and construction technologies that characterise the building sector (for example in the case of technologies for the deconstruction of the building and the reworking of its components at the end of the building's life) should be overcome; on the other new organisational and managerial (and business) models based on innovative tools and relationships between operators, related to the entire life cycle of resources (in terms

of the extent of the producer's responsibility, of the product-service, etc.), should be activated. This means fostering the dialogue between operators in different fields (procurement, production, distribution, installation, maintenance, disassembly, reverse logistics, remanufacturing/reuse, etc.), improving the management of information on the material flows of resources along the entire supply chain, and the synergy with other production chains with a view to proximity of resources, integration of services and circularity.

## Identifying Enabling Technologies for circular economy

There are many Enabling Technologies to support these transition paths<sup>1</sup>. A first grouping concerns "soft" digital technologies (Chauhan *et al.*, 2022), whose support consists in collecting and networking information over time

cessi/risorse, interoperabili con strumenti di elaborazione dei dati, ossia di modellazione, valutazione e supporto alle decisioni (Giorgi *et al.*, 2022a).

Il BIM (*Building Information Modeling*) è in grado di mettere in relazione molteplici aspetti progettuali e gestionali dell'edificio lungo il suo ciclo di vita, attraverso la rete multi-stakeholder (Charef *et al.*, 2021; Eadie *et al.*, 2013), ma va integrato con altri strumenti.

*Internet of Things* consente di raccogliere, immagazzinare, connettere ed elaborare una notevole quantità di dati, che possono fornire informazioni utili per: l'ottimizzazione dei processi; la gestione del patrimonio costruito (*facility management*, politiche e pianificazione istituzionale, ecc.); la tracciabilità e il monitoraggio in tempo reale, favorendo le valutazioni del ciclo di vita, la manutenzione predittiva e la gestione del fine vita (e del riuso).

*Digital twin* di prodotti-edifici-quartieri-città (mappatura dell'esistente) consente oltre che una raccolta ordinata delle informazioni, la possibilità di modellizzare scenari, supportando la progettazione e i processi di manutenzione e riuso (per esempio, modellizzare una porta e il suo utilizzo, per definire diverse opzioni di *remanufacturing* a fine vita e condividere i risultati su piattaforma web per personalizzare in base alle richieste dei possibili acquirenti, ottimizzando le rilavorazioni per il riuso).

I *Big Data* possono consentire la raccolta di informazioni (es. satellitari, sul comportamento degli utenti durante l'uso), e favorire la personalizzazione, la manutenzione predittiva, la previsione dei cicli di durata e sostituzione. Tali informazioni possono aiutare la progettazione e allungare la vita del prodotto.

*Artificial Intelligence (IA) e Machine Learning* possono suppor-

between operators. The monitoring of said information throughout the life cycle constitutes an important cognitive element in support of predictive and planning analyses for reuse, thus creating a "circularity" of information (information on use/disassembly/end of life/reuse, in support of subsequent design and manufacturing activities). There is a need for management tools (data storage, analysis and sharing) that facilitate the collection of data along the life cycle of resources, the exchange of data in real time, and the availability and usability of data relating to the monitoring of the life cycles of products/processes/resources, interoperable with data processing tools, i.e. modelling, evaluation and support for decision-making (Giorgi *et al.*, 2022a). BIM (*Building Information Modelling*) is able to relate multiple design and management aspects of the building

throughout its life cycle, through the multi-stakeholder network (Charef *et al.*, 2021; Eadie *et al.*, 2013), but it must be integrated with other tools.

The *Internet of Things* makes it possible to collect, store, connect and process a considerable amount of data, which can provide useful information for: process optimisation; management of the building stock (*facility management*, policies and institutional planning, etc.); traceability and real-time monitoring, facilitating life cycle assessments, predictive maintenance and end of life (and reuse) management.

A *digital twin* of products-buildings-districts-cities (mapping of the existing) allows not only an orderly collection of information, but also the possibility of modelling scenarios, supporting the design as well as maintenance and reuse processes (for example, modelling a door and its use,

to define various end of life remanufacturing options and to share the results on a Web platform for customisation according to the requests of potential buyers, optimising rework for reuse).

*Big Data* allows the collection of information (e.g. satellite, on user behaviour during use), and favours customisation, predictive maintenance, prediction of life and replacement cycles. Such information can support design and extend product life.

*Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning* can support project choices towards resource optimisation, replacing deterministic models based on simulation (which require exhaustive input data) with forecasting models based on few inputs. Furthermore, AI is being used for material tracking and for better waste separation thanks to image recognition.

*Blockchain* supports traceability, transparency and sharing of information, and simplification of certification processes. Online platforms (*digital web-based platforms*) can facilitate networking between operators in the supply chain and the exchange of both information and end of life materials-products (see next paragraph) or production waste from one industry to another.

Active and passive *smart tags*, based on RFID, sensors and barcodes to be applied to products, allow the traceability of information over time, but also monitoring during use or logistics. A second grouping is made up of "hard" Enabling Technologies, which concern both production processes, construction/disassembly processes, and end of life reworking processes (reuse). The optimisation of material flows (e.g. reuse and circularity of re-

*Automated Systems and Robotics* sono un importante supporto per la prefabbricazione off-site, volta all'uso ottimizzato delle risorse, alla riduzione degli sfridi (tipici del cantiere artigiana-

to define various end of life remanufacturing options and to share the results on a Web platform for customisation according to the requests of potential buyers, optimising rework for reuse).

*Big Data* allows the collection of information (e.g. satellite, on user behaviour during use), and favours customisation, predictive maintenance, prediction of life and replacement cycles. Such information can support design and extend product life.

*Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning* can support project choices towards resource optimisation, replacing deterministic models based on simulation (which require exhaustive input data) with forecasting models based on few inputs. Furthermore, AI is being used for material tracking and for better waste separation thanks to image recognition.

*Blockchain* supports traceability, transparency and sharing of information, and simplification of certification processes. Online platforms (*digital Web-based platforms*) can facilitate networking between operators in the supply chain and the exchange of both information and end of life materials-products (see next paragraph) or production waste from one industry to another.

Active and passive *smart tags*, based on RFID, sensors and barcodes to be applied to products, allow the traceability of information over time, but also monitoring during use or logistics.

A second grouping is made up of "hard" Enabling Technologies, which concern both production processes, construction/disassembly processes, and end of life reworking processes (reuse). The optimisation of material flows (e.g. reuse and circularity of re-

le), alla modularità e reversibilità costruttiva per favorire l'adattabilità e la manutenibilità. Nel riuso/*remanufacturing* potrebbero supportare lavorazioni personalizzate di piccoli lotti e di prodotti altamente differenziati.

*Additive Manufacturing* o con stampa 3D consente un uso efficiente delle risorse e un maggiore controllo/libertà delle geometrie (e quindi alta personalizzazione) in base agli input dei modelli digitali, favorendo anche la creazione di componenti mancanti per rigenerare/riparare un prodotto o elemento costruttivo.

I processi di gestione "automatizzata" possono confliggere con una gestione "artigianale" di flussi poco omogenei tipici del riuso e del *remanufacturing* in ambito edilizio, che non permettono di "industrializzare" i processi di rilavorazione. Si tratta di indagare le potenzialità di "flessibilità" che le Tecnologie Abilitanti hard riescono ad avere (es. macchine adattive e integrazione IT/OT).

Occorrerebbe inoltre esplorare applicazioni nell'ambito del cantiere, non solo in fase di montaggio. Per esempio, l'uso di robot per la demolizione selettiva potrebbe far fronte a una delle maggiori criticità della decostruzione, ossia l'alto costo della manodopera per lo smontaggio degli elementi costruttivi (e anche assicurare la massima precisione e i minimi danni sugli elementi smontati).

### Applicazioni pilota europee

A livello europeo, esistono alcune esperienze pilota<sup>2</sup> riguardo tecnologie abilitanti "hard" e "soft".

Il progetto "*Building As Material Bank*"<sup>3</sup> (BAMB) è stato pioniero nella sperimentazione dei "*Materials Passport*" (MP), ovvero

sources) can be obtained by changes in management models (e.g. products-services) supported by soft technologies, but must be accompanied by a better and more efficient ability to carry out physical operations of production, rework of components, assembly and disassembly, etc.

*Automated systems* and *robotics* are an important support for off-site prefabrication aimed at optimising the use of resources, reducing waste (typical of the artisan site work), modularity and constructive reversibility to favour adaptability and maintainability. In reuse/*remanufacturing* they could support customised processing of small batches and highly differentiated products.

*Additive manufacturing* or *3D printing* allows an efficient use of resources and greater control/freedom of geometries (and, therefore, high customisation)

based on digital model inputs, also favouring the creation of missing components to regenerate/repair a product or constructive element.

The "automated" management processes can conflict with the "artisanal" management of not very homogeneous flows typical of reuse and *remanufacturing* in the building sector, which do not allow the reworking processes to be "industrialised". The potential for "flexibility" that hard Enabling Technologies could have (e.g. adaptive machines and IT/OT integration) should be investigated.

It would also be necessary to explore applications within the construction site, not just during the assembly phase. For example, the use of robots for selective demolition could address one of the major challenges of deconstruction, i.e. the high cost of labour for the disassembly of the building

strumenti digitali, interoperabili con *software* BIM, in grado di raccogliere l'insieme di dati che descrivono le caratteristiche dei materiali e dei componenti facenti parte di prodotti ed edifici (EPEA, 2017). In particolare, secondo quanto proposto da BAMB, i produttori dovrebbero alimentare una piattaforma condivisa e accessibile (*Material Passport Platform*) per mettere a disposizione di progettisti, gestori del patrimonio edilizio e utenti finali, tutte le informazioni utili per la gestione dei materiali stoccati nell'edificio. Il MP deve contenere:

- informazioni per identificare i prodotti stoccati nell'edificio (es. produttore, marca di prodotto);
- raccolta delle schede tecniche, EPD (*Environmental Product Declaration*) e MSDS (*Material Safety Data Sheet*) dei prodotti;
- informazioni su uso e manutenzione dei prodotti installati nell'edificio e le istruzioni su come assemblarli e disassemblarli;
- indicazioni sul fine vita dei prodotti o ulteriori cicli di vita, ad esempio potenziale riutilizzabilità, rilavorabilità o riciclabilità.

Anche se l'applicazione dei MP nel settore edilizio è ancora scarsa e in fase iniziale (Munaro and Tavares, 2021) l'innovazione apportata da BAMB è stata colta dalla Fondazione Madaster che ha sviluppato una piattaforma, interattiva con file sorgente BIM, per l'archiviazione e lo scambio di dati relativi a materiali, componenti e prodotti stoccati negli edifici (Rau and Oberhuber, 2019). Gli utenti primari sono i progettisti, i proprietari degli edifici e i *facility manager* che attraverso la piattaforma possono generare passaporti di edificio (simili a report informativi).

elements (and also ensure maximum precision and minimum damage on the disassembled elements).

### European pilot applications

At European level some pilot experiences<sup>2</sup> have concretely dealt with "hard" and "soft" Enabling Technologies.

The project "*Buildings As Material Banks*" (BAMB)<sup>3</sup> was a pioneer in the experimentation of "*Material Passports*" (MP), i.e. digital tools, interoperable with BIM software, capable of collecting data about characteristics of materials and components that constitute products and buildings (EPEA, 2017). In particular, as suggested by BAMB, manufacturers should provide useful information for the management of materials stored in the building to a shared and accessible platform (*Material Passport Platform*) available

to designers, building managers and end users. The MP must contain:

- information to identify products stored in the building (e.g. manufacturer, product brand, etc.);
- collection of product technical data sheets, EPD (Environmental Product Declaration) and MSDS (Material Safety Data Sheet);
- information about the use and maintenance of products installed in the building and instructions for assembling and disassembling them;
- indications about the end of life of products and further life cycles, for example potential reuse, *remanufacturing* or recycling.

Even if the application of MPs in the building sector is still scarce and in an early stage (Munaro and Tavares, 2021), the innovation introduced by BAMB was taken up by the Madaster

Partendo dalle informazioni sull'edificio e sui prodotti, archiviate in gemelli digitali all'interno di file BIM, la piattaforma elabora tali file BIM e li arricchisce con dati provenienti da database interni alla piattaforma stessa, basati su fonti sia proprietarie sia pubbliche. L'accuratezza e l'affidabilità dei dati Madaster si basano sulla completezza delle informazioni contenute nel file di origine BIM (*digital twin*), provenienti da tutti gli operatori coinvolti lungo il processo edilizio. La piattaforma restituisce, poi, diverse informazioni relative alla scala dell'edificio e alla scala del prodotto. Tali informazioni costituiscono una fonte affidabile di dati per sviluppatori, finanziatori e progettisti, utile ad allungare la vita utile degli edifici e ad alimentare nuovi mercati basati sulla circolarità dei materiali. La piattaforma Madaster assicura la riservatezza e la disponibilità dei dati e gestisce l'accessibilità di terze parti.

Oltre alle informazioni sui prodotti e sulle relative quantità stoccate nell'edificio, Madaster mostra anche il valore economico netto di ciascun materiale, attingendo le informazioni da database interni alla piattaforma, alimentati da differenti fonti come "Federal Reserve Economic data", "London Metal Exchange", ecc. Esiste la volontà di includere anche il profilo ambientale dei prodotti, ma la collezione dei dataset ambientali risulta ancora incompleta. La valutazione economica fornisce una previsione dei costi di demolizione e di trasporto di ciascun materiale a fine vita: il confronto tra costo di fine vita e valore economico netto definisce il valore residuo dei materiali e il vantaggio (o svantaggio) economico del potenziale riutilizzo dello stesso (Fig. 1). Esempi concreti di edifici dotati di MP sono i progetti dello studio di architettura RAU Architects, come Alliander Headquarters, tra i primi edifici censiti nella piattaforma, e la nuova sede

Foundation, which developed a platform, interactive with BIM source files, for archiving and exchanging data relating to materials, components and products stored in buildings (Rau and Oberhuber, 2019). The primary users are designers, building owners and facility managers who, through the platform, can generate building passports (similar to information reports).

Starting from information about the building and products, stored in digital twins as BIM files, the platform processes these BIM files and adds data from internal databases, based on both proprietary and public sources. The accuracy and reliability of Madaster data are based on the completeness of information contained in the BIM source file (digital twin) and coming from all operators involved along the building process. Finally, the platform returns miscellaneous information re-

lating to the building scale and product scale. This information is a reliable source of data for developers, investors and designers. It is useful to extend the service life of buildings and to activate new markets based on material circularity. The Madaster platform ensures confidentiality and availability of data, and manages third party access.

In addition to product-related information and related quantities stored in the building, Madaster shows the net economic value of each material, drawing information from internal databases of the platform, based on different sources, such as "Federal Reserve Economic data", "London Metal Exchange", etc. There is also a willingness to include the environmental profile of the products, but the collection of environmental datasets is still incomplete. The economic evaluation provides a forecast of the demolition

di Triodos Bank, recente esempio per il quale la generazione dei MP in Madaster è stata eseguita in maniera il più possibile accurata attraverso una collaborazione integrata tra tutte le parti nel processo di sviluppo e costruzione.

Strumenti come i MP sono stati pensati anche per abilitare a catena altre tecnologie: le informazioni registrate in BIM se aggiunte ai dati GIS (*Geographic Information System*) possono alimentare il CIM (*City Information Modeling*) che consente di inventariare, visualizzare, analizzare, monitorare e gestire le risorse stoccate all'interno dell'ambiente costruito.

Tali informazioni, inoltre, permettono di sviluppare in modo più preciso ed efficace *digital web-based platform* per lo scambio di materiali, abilitando il riuso e l'estensione della vita utile dei prodotti, dando la possibilità a progettisti e utilizzatori finali di scegliere prodotti presenti sul mercato secondario. In particolare, nel nord Europa, si trovano esempi di piattaforme di scambio materiali che stanno diventando spazi di mercato virtuale che mettono in circolo prodotti secondari. Esempi sono le piattaforme "Salvo", che interessa la zona territoriale di UK e Irlanda, "Opalis", che ricopre il territorio di Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo, e "Bellastock" in Francia. Queste piattaforme tracciano e georeferenziano i materiali secondari disponibili, mettendo in comunicazione diversi operatori, attivando dinamiche di *remanufacturing* e recupero che estendono la vita utile delle risorse materiali già consumate nel settore edilizio. Indagini statistiche del settore del riuso condotte nell'area nord europea dal progetto Interreg NWE 739<sup>4</sup>, ha mostrato che tali mercati "digitali" coprono attualmente un volume economico di oltre 500 milioni di euro di fatturato relativo alle vendite di materiali di recupero, contano circa 7.000 dipendenti a tempo pieno e 615.000 tonnellate di materiali stoccati.

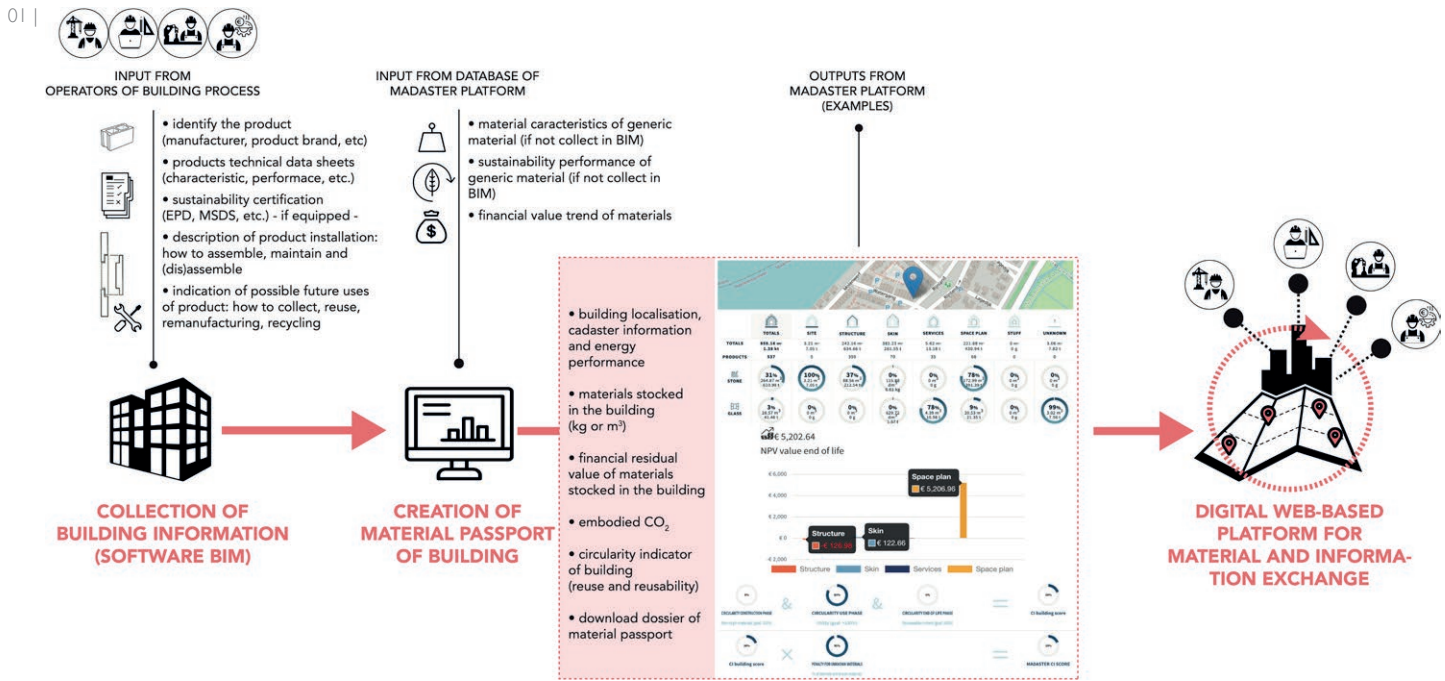
and transport costs of each material at the end of its life: the comparison between the end of life cost and the net economic value defines the residual value of materials and the economic advantage (or disadvantage) of its potential reuse (Fig. 1).

Example cases of buildings equipped with MP are given by projects designed by RAU Architects, such as the Alliander Headquarters, which is among the first buildings surveyed in the platform, and the new headquarters of Triodos Bank. For this last more recent example, the generation of MPs in Madaster was performed as accurately as possible through an integrated collaboration between all operators in the development and construction process.

Tools such as MPs have also been designed to enable other technologies: the information recorded in BIM, if added to GIS (Geographic Informa-

tion System), can provide CIM (City Information Modelling), which allows to inventory, view, analyse, monitor and manage the resources stored within the built environment.

Furthermore, this information enables the development of a more precise and effective digital Web-based platform for materials exchange, enhancing the reuse and extension of the product's service life, empowering designers and end users to choose products present on the secondary market. In particular, in northern Europe, material exchange platforms are becoming virtual market spaces that make secondary products available. Examples are the platforms "Salvo", which covers the territorial area of the UK and Ireland, "Opalis", which covers the territory of Belgium, The Netherlands and Luxembourg, and "Bellastock" in France. These platforms track and georeference the sec-



Nell'ambito delle tecnologie "hard", la ricerca BAMB e il Laboratory for Green Transformable Buildings hanno sperimentato progetti pilota per testare tecnologie reversibili e tecniche di costruzione off-site. Tra i primi, il Circular Retrofit Lab<sup>5</sup> ha riguardato la riqualificazione di un edificio degli anni '70 adibito ad alloggio per studenti a Bruxelles. Particolare attenzione è stata data alla fase di progettazione e alle scelte delle connes-

sioni connotate dalla facilità e rapidità di assemblaggio e disassemblaggio. La sperimentazione ha riguardato soluzioni di pareti perimetrali e partizioni interne in grado di aumentare l'adattabilità dell'edificio per un riuso nel tempo. L'involucro è stato costruito completamente off-site e agganciato alla struttura portante esistente attraverso un assemblaggio a secco. Le partizioni interne sono state co-create tra progettisti e produt-

ondary materials available, connecting different operators, activating remanufacturing and recovery dynamics that extend the service life of the material resources already used in the construction sector. Statistical surveys of the reuse sector, conducted in the northern European area by project Interreg NWE 739<sup>4</sup>, showed that these "digital markets" currently cover an economic volume of over 500 million euros in turnover relating to the sales of recycled materials, numbering around 7,000 full-time employees and 615,000 tons of stored materials.

In the field of "hard" technologies, BAMB research and the Laboratory for Green Transformable Buildings have experimented pilot projects to test reversible technologies and off-site construction techniques. Among the first projects, the Circular Retrofit Lab<sup>5</sup> involved the redevelopment of

a 1970s building used as student accommodation in Brussels. This pilot project pays particular attention to the design phase and to the choices of the connections characterised by easy and rapid assembly and disassembly solutions. The experimentation concerned solutions for envelope walls and internal partitions capable of increasing the adaptability of the building for reuse over time. The envelope was built completely off-site and anchored to the existing load-bearing structure through dry connections. The internal partitions were co-created between designers and manufacturers to envision, plan and apply constructive solutions that enable easy disassembly and reuse.

#### The SocKETs project and the Italian context

The European project SocKETs<sup>6</sup> (Societal Engagement with Key Enabling

Technologies) focused on Enabling Technologies and developed six different participatory processes in six countries (Bulgaria, Estonia, Italy, The Netherlands, Serbia, and Spain). The ultimate objective of these societal engagement processes has been to test "co-creation" methodologies as an instrument to align technological development to societal values and needs. The Italian participatory process (SocKETs Lab) mainly focused on Technologies enabling the transition of the building and construction sector towards circular economy.

The starting point was the identification of the innovation ecosystem related to the specific sector. This was carried out with a desk analysis and by conducting interviews involving different kinds of experts, leading to a mapping of technologies, application scenarios, actors, roles and relations,

drivers, challenges, and barriers. The Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and distributed ledger technologies (e.g. Blockchain) were identified as the main "soft" technologies, while robotics and advanced manufacturing systems, some satellite technologies, drones, and advanced materials were the main "hard" ones. Table 1 shows the innovation areas where these technologies can be applied, and lists the drivers and the challenges they can contribute to, in compliance with the circular economy principles. Many identified applications are related to the digitalisation of processes or products/services, with the final goal of reaching an efficient use of energy and other resources (primarily materials, but also space within the built environment).

Three kinds of stakeholders, playing heterogeneous roles and having differ-

tori per prevedere, programmare e applicare soluzioni costruttive che abilitino il facile disassemblaggio e riuso.

### Il progetto SocKETs e lo scenario italiano

Le Tecnologie Abilitanti sono state oggetto di studio del progetto europeo SocKETs<sup>6</sup> (Social Engagement with Key Enabling Technologies), che ha realizzato 6 percorsi partecipativi in altrettanti paesi (Bulgaria, Estonia, Italia, Olanda, Serbia e Spagna) con l'obiettivo di testare le metodologie della "co-creation" nell'allineare lo sviluppo tecnologico ai valori e alle sfide della società. In particolare, il percorso partecipativo (SocKETs Lab) realizzato in Italia si è focalizzato sulle tecnologie per la transizione verso l'economia circolare del settore edilizio e delle costruzioni.

La prima fase è stata l'individuazione dell'ecosistema dell'innovazione relativo a questo ambito, mediante uno studio della letteratura e del mercato e la realizzazione di interviste a diverse tipologie di esperti del settore, al fine di mappare tecnologie e scenari applicativi, attori, ruoli e relazioni, drivers, sfide e barriere.

Le principali tecnologie individuate sono l'*Internet of Things* (IoT), l'Intelligenza Artificiale (AI) e le tecnologie basate su registri distribuiti (es. *Blockchain*), tra quelle "soft", la robotica e i sistemi di manifattura avanzata, alcune tecnologie satellitari, i droni e i materiali avanzati, tra quelle "hard". La Tabella 1 mostra in quali aree di innovazione possano essere impiegate queste tecnologie e i relativi *drivers* o le sfide a cui possono contribuire a dare una risposta, nel rispetto dei principi dell'economia circolare. Una larga parte delle applicazioni riguarda la digitalizzazione di processi e prodotti o servizi con l'obiettivo di

ent connections within the innovation ecosystem, have been identified by using the application scenarios as a starting point. *Primary stakeholders* include research centres, academia, organisations dealing with technology transfer, companies directly involved in the development or production of the cited technologies. Examples of these companies span from building and construction, chemicals, materials, to electronic and digital sectors. This first group also includes professionals, both as individuals and organised in associations representing their stakes, such as engineers, architects, designers, as well as professionals providing digital services. Utilities companies are an additional example, as they provide services directly connected to building construction and management. All these primary stakeholders are directly involved in developing new technolo-

gies for the building and construction sector.

*Secondary stakeholders* have a strong interest in using Enabling Technologies within the building and construction sector, but they are not directly involved in their development process. Secondary stakeholders may include building owners and end users (e.g. people working or living inside a building), associations or public authorities dealing with management of the building, trade associations, investors, local, national or European authorities, certification or standardisation bodies.

The last group comprises the *contextual stakeholders* who are indirectly connected to the building and construction sector's development or those who can influence the sector's dynamics since they contribute to shape its economic and societal context. Con-

realizzare un uso più efficiente dell'energia o di altre risorse (in primo luogo materiali, ma anche spazi nell'ambiente costruito). Intorno a questi scenari applicativi, sono state individuate tre tipologie di attori che, con ruoli e relazioni differenti, animano l'ecosistema delle innovazioni sopra citate. Tra gli attori "primari" si possono includere i centri di ricerca e le università, le organizzazioni che si occupano di trasferimento tecnologico, le imprese direttamente coinvolte nello sviluppo e produzione delle tecnologie in questione: quelle edili, ma anche quelle del mondo della chimica e dei materiali, dei componenti o dei settori digitali coinvolti, i professionisti e le associazioni che li raggruppano (come ingegneri o architetti e designers, ma anche i professionisti del digitale), e le *utilities* che gestiscono servizi direttamente collegati alla realizzazione e funzionamento degli edifici. Tutti questi attori sono direttamente coinvolti nello sviluppo delle nuove tecnologie per il settore.

Tra gli attori "secondari" vi sono invece tutti quelli che non sono strettamente coinvolti nello sviluppo delle nuove tecnologie, ma sono interessati in modo diretto dal loro utilizzo. Tra questi ci sono i proprietari e gli utilizzatori (residenti, lavoratori, etc.) degli edifici o le associazioni/enti che si occupano della loro gestione, le associazioni di categoria, gli investitori, le autorità e le istituzioni di livello locale, nazionale ed europeo, organismi di standardizzazione e certificazione.

Infine, ci sono gli attori che possono essere interessati dallo sviluppo del settore in modo indiretto o che sono in grado di determinarne le sorti perché generano il contesto economico e sociale in cui esso avviene. Tra questi attori "di contesto" si possono includere enti pubblici, associazioni di cittadini o di consumatori, compagnie assicurative, mass media, rappresentanti dei lavorato-

textual stakeholders may include public authorities, citizens or consumer organisations, insurance companies, trade unions and the media. Some of the players underscored the role of future generations within this category, as on the one hand they cannot influence current decisions, and on the other they represent the most relevant stakeholders when looking at long-term societal challenges (e.g. resource availability, climate change, inclusion and social justice) of the sector.

### Stakeholder engagement and co-creation experiences

The SocKETs participatory process started by involving the ecosystem's primary stakeholders with the aim of defining possible application scenarios for the identified technologies. Two distinct scenarios emerged for innovation towards circularity: one related to

the whole value chain (Fig. 2) and one related to the built environment, with specific focus on cities and neighbourhoods (Fig. 3).

Stakeholders turned out to be open to discussion and highlighted a strong need to share and collaborate inside the building and construction sector, to overcome barriers to innovation and to succeed in the transition towards circularity. Primary actors were so motivated to find common strategies to overcome the challenges that they actively contributed to widen the participation by involving other primary and secondary actors, in a cascade.

The definition of a shared strategy for growth, innovation, and sustainability was recognised as a primary goal by all the stakeholders. The two scenarios were acknowledged as a valid starting point to create a national strategy to

Tab 01 | Sfide del settore e aree di innovazione in cui le KETs possono essere sfruttate per dare una risposta alle sfide  
*Building and construction sector challenges and innovation areas where Key Enabling Technologies can contribute to provide answers*

ri. In quest'ultima categoria alcuni degli attori hanno sottolineato il ruolo delle future generazioni, che non possono incidere direttamente sulle dinamiche attuali, ma diventano i portatori d'interesse principali se si guarda allo sviluppo del settore come una leva per agire su sfide sociali di lungo periodo (come la disponibilità di risorse, i cambiamenti climatici, l'inclusione e la giustizia sociale).

**Esperienze di coinvolgimento degli operatori e co-creazione**

Il percorso partecipativo di SocKETs ha coinvolto in prima battuta gli attori primari dell'ecosistema, per delineare ipotesi

di scenari applicativi delle tecnologie individuate. Ne sono emersi due scenari per l'innovazione verso la circolarità, riferiti a tutta la catena del valore (Fig. 2) e all'ambiente costruito, con particolare focus sui quartieri e le città (Fig. 3).

Gli stakeholder hanno manifestato disponibilità al confronto e un forte bisogno di condivisione e collaborazione all'interno del settore per superare le barriere all'innovazione e per garantire un successo diffuso alla transizione verso una maggiore circolarità. Gli attori primari del settore sono così motivati nella ricerca di strategie comuni per superare queste sfide che hanno contribuito attivamente ad ampliare la partecipazione, coinvolgendo loro stessi, a cascata, altri attori primari e secondari.

L'obiettivo di creare una strategia condivisa per la crescita, l'innovazione e la sostenibilità è stato trasversalmente riconosciuto come prioritario e i due scenari sviluppati sono stati ritenuti un valido punto di partenza per la creazione di una strategia nazionale per l'innovazione del settore.

Nello scenario dedicato alla catena del valore, emerge la necessità primaria di ridurre il consumo di risorse. Da qui l'impor-

tanza data alle tecnologie che possano consentire la riduzione degli sprechi in fase di fabbricazione (es. tramite industrializzazione e automazione dei processi produttivi), la durabilità (es. grazie a materiali avanzati e uso dei *digital twin* per gestione e manutenzione) oppure il riuso dei componenti e il riciclo dei materiali. In questo percorso le tecnologie soft diventano il fattore abilitante di tutti i processi, garantendo una forte integrazione e ottimizzazione e la capacità di fornire supporto alle decisioni, sempre più sulla base dell'analisi dei dati reali e delle esigenze degli stakeholder.

Nello scenario dedicato all'ambiente costruito, la circolarità si raggiunge mediante l'efficientamento energetico, ma soprattutto mediante modelli di gestione degli spazi che ne consentano la massima efficacia/utilità durante l'uso. In quest'ottica assumono un ruolo centrale le tecnologie e tecniche costruttive che consentono di avere edifici modulari, assemblabili e disassemblabili, trasformabili o riutilizzabili. In questo contesto, le tecnologie digitali sono abilitanti perché ottimizzano la gestione di ogni spazio che possa essere condiviso tra gli utenti o trasformato per nuovi utilizzi.

**Leve e barriere all'applicazione delle Tecnologie Abilitanti**

Le ricerche presentate restituiscono un articolato quadro di "conoscenze sul campo", grazie al confronto diretto con mol-

tiple operatori (interviste e workshop con esperti, processi partecipativi), a livello sia europeo sia italiano. Dalle ricerche europee e dal confronto con gli stakeholder sono emerse le potenziali leve e le barriere all'applicazione delle Tecnologie Abilitanti (SocKETs Lab italiano, 2020; Giorgi *et al.*, 2022b).

innovate the building and construction sector.

The value chain scenario highlights a paramount need to reduce consumption of resources. Hence the crucial role of technologies useful to reduce wastefulness in the manufacturing phase (e.g. industrialisation or automation of manufacturing processes), to increase durability (e.g. advanced materials or digital twins for maintenance and management), or to allow reuse of components and recycling of materials. Soft technologies become enabling for almost all processes in the path towards circular value chains, since they guarantee strong integration, optimisation, and support for decision-making, which increasingly underpins the analysis of actual data and stakeholders' needs.

In the built environment scenario, energy efficiency and management

models aimed at maximising efficacy/benefits in the use of spaces are key to achieve circularity. In this case, technologies and construction techniques enabling the development of modular buildings (i.e. buildings - or part of them - that can be assembled, disassembled, transformed or reused) play a central role. Digital technologies are also important since they enable space optimisation, for example when the space needs to be transformed for new uses or when it is shared by different users.

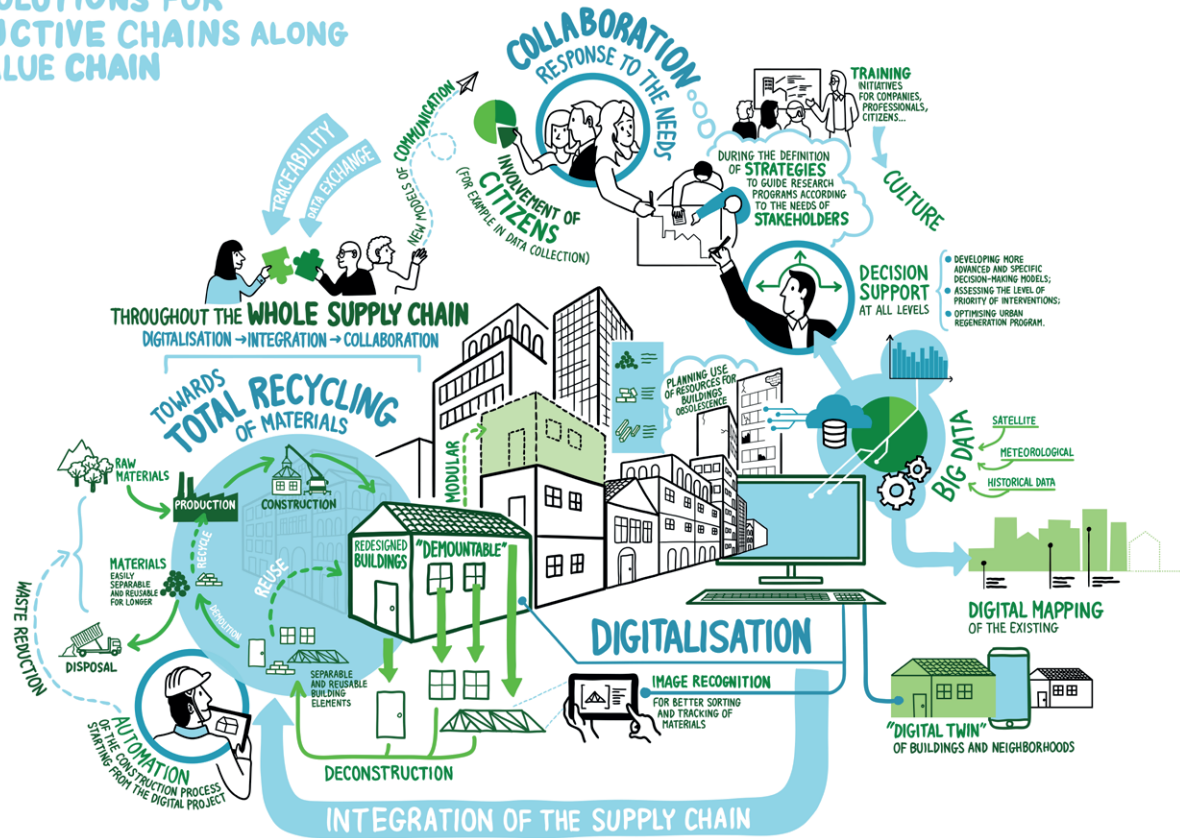
**Levers and barriers to the application of Enabling Technologies**

The research activities described above return an articulated framework of "knowledge on-field", thanks to the discussion with multiple operators (interviews and workshops with experts, participatory processes), at both

BUILDING SECTOR DRIVERS/CHALLENGES	INNOVATION AREAS	TECHNOLOGIES
Urban regeneration, land use	Urban planning Shared models Modularity and durability Selective deconstruction	IoT, AI Drones, Satellite technologies, Advanced materials, Advanced manufacturing systems
Reducing materials consumption and waste	Modularity and durability Selective deconstruction Industrial (off-site) production New materials	IoT, Blockchain, AI (also associated to BIM methodologies) Advanced materials (e.g., self-healing materials or advanced recycled materials)
Waste management	Traceability	IoT, AI, blockchain Robotics
Reducing externalities (pollution, CO <sub>2</sub> emissions, ...)	Energy efficiency New materials Industrial production	IoT Advanced materials, advanced manufacturing
Energy efficiency and transition to renewable energy	Smart control Deep optimization New solutions for energy production and storage	IoT, AI Advanced materials
Comfort, quality	Smart control	IoT
Duration, security	Predictive maintenance	IoT, AI

| Tab. 01

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS FOR PRODUCTIVE CHAINS ALONG THE VALUE CHAIN



ARTWORK BY JACOPO SACQUEGNO 15/11/21



European and Italian levels. Potential levers and barriers to the application of Enabling Technologies emerged from both the analysis and discussions with stakeholders (Italian SocKETs Lab, 2020; Giorgi *et al.*, 2022b).

The potential levers are legislative and economic. The implementation of the minimum environmental criteria in the Green Public Procurement (in addition to the current ones applied in Italy on disassembly and traceability) and the inclusion of rewarding or mandatory criteria in the various regulatory devices is a fundamental lever for all aspects of sustainability, and the related tools (e.g. LCA). Furthermore, the increase in the cost of raw materials (especially those from abroad) and, therefore, in the market itself, leads operators to consider the potential economic benefit of reusing and extending the service life of products through

Enabling Technologies, also linked to new “product-service” solutions. In this direction, the public sphere (and once again the GPP criteria) can be a driving force for the market (since the public client is also the manager of the building stock).

The main barriers identified by the stakeholders concern: the need for new professional figures, new roles and new operators along the building process; the lack of standards and guidelines; the general concern about the commitments that technological change entails in practice; lack of awareness of the benefits offered by new technologies, and a general difficulty in identifying the benefit; the need to increase the skills of the operators involved, through specific training courses; the inability of medium and small enterprises (SMEs), which are widely present in Italy, to manage the

resources (economic, time) necessary to acquire technologies and specialised operators. Industry professionals also highlight the risk of losing recognition of their professionalism in the industrialisation process enabled by some technologies, which would see them absorbed as technicians within the industry, which on average offers lower levels of pay and flexibility than the free profession. Companies, in turn, underline the need to inform and train the population on new technologies and their advantages so that they know how to recognise the added value, both immediate and over time, associated with innovation.

Enabling Technologies are knowledge-intensive and associated with high R&D intensity, rapid innovation cycles, large capital expenditures and highly skilled jobs. This requires the implementation of transversal syner-

gies between the various operators in the supply chain. Some technologies (e.g. digital, additive manufacturing) have a high energy consumption. Their use cannot be purely instrumental and linked to “innovation for the sake of innovation”. It is necessary to define ways and methods for their actual use to achieve a positive environmental impact.

Applying Life Cycle Assessment procedures that highlight the environmental costs (e.g. high energy consumption behind digital technologies) and the benefits in terms of quality and environmental impact that can be obtained from the use of advanced technologies (e.g. saving on materials) is essential for choosing the truly effective technologies in an assessment of the entire life cycle, and also highlight the critical aspects that an excessively intensive use of such technologies could entail.





i loro vantaggi in modo che sappiano riconoscere il valore aggiunto, immediato e nel tempo, associato all'innovazione.

Le Tecnologie Abilitanti sono ad alta intensità di conoscenza e associate a elevata intensità di ricerca e sviluppo, a cicli di innovazione rapidi, a consistenti spese di investimento e a posti di lavoro altamente qualificati. Questo richiede la messa in campo di sinergie trasversali tra i diversi operatori della filiera. Alcune tecnologie (es. digitale, manifattura additiva) sono ad elevato consumo energetico, per cui, affinché il loro uso non sia puramente strumentale e legato all'innovazione per l'innovazione, occorre definire le modalità per un loro utilizzo con un effettivo beneficio ambientale.

Applicare procedure di valutazione LCA che evidenzino i costi ambientali (es. elevati consumi energetici dietro le tecnologie digitali) e i benefici in termini di qualità e di impatto ambientale ottenibili dall'uso di tecnologie avanzate (es. risparmio di materiali) risulta essenziale per scegliere le tecnologie realmente efficaci in un bilancio dell'intero ciclo di vita ed evidenziare anche gli aspetti di criticità che un uso eccessivamente intensivo di tali tecnologie potrebbe comportare.

Il bilancio ambientale va svolto in parallelo a quello sociale ed economico, in quanto occorre valutare anche i costi di tali tecnologie e quantificare che i benefici siano altrettanto significativi. Le valutazioni costi-benefici diventano fondamentali per gli operatori coinvolti per avvicinarsi con interesse a tali tecnologie.

Dalle ricerche svolte emerge una realtà, soprattutto in Italia, ancora molto tradizionale, con interesse al tema ma con ancora poca applicazione, se non sperimentale. Per innescare il cambiamento, è stato individuato come basilare il creare momenti

di condivisione e di messa in rete di operatori, utili per attivare sinergie capaci di avviare i processi di innovazione. Le sperimentazioni discusse nell'articolo hanno aiutato a creare una rete di attori dell'ecosistema dell'innovazione nazionali interessata e attiva sui temi delle tecnologie per la circolarità, che si attiverà per promuovere a vari livelli le proposte e strategie identificate.

#### NOTE

<sup>1</sup> Gli scenari di applicazione delle Tecnologie Abilitanti derivano da letteratura e da interviste/workshop con stakeholder e sono stati integrati da ipotesi degli autori.

<sup>2</sup> Le esperienze citate sono state oggetto di interviste dirette e periodi di collaborazione (Giorgi *et al.*, 2022b).

<sup>3</sup> Il progetto BAMB, "Building as Material Banks" (2015-2019) ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea, ha coinvolto quindici partner provenienti da sette paesi diversi, e una fitta rete di stakeholder.

<sup>4</sup> Interreg NWE 739 Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements (FCRBE), coinvolge le seguenti nazioni: UK, Irlanda, Paesi Bassi, Belgio, Lussemburgo, Francia.

<sup>5</sup> Progetto sviluppato dalla Vrije Universiteit Brussel (VUB) all'interno del Progetto europeo BAMB, realizzato nel 2019.

<sup>6</sup> Il progetto SocKETs, di cui AIRI è partner e a cui partecipano gli autori, ha ricevuto finanziamento dal Programma quadro per la Ricerca e Innovazione Horizon 2020 della Unione Europea, grant agreement nr. 958277.

The environmental balance must be carried out in parallel with the social and economic one, as it is also necessary to evaluate the costs of these technologies and to quantify that the benefits are equally significant. Cost-benefit assessments become crucial for the operators involved to approach these technologies with interest.

The research carried out reveals a very traditional context, especially in Italy. There is an interest in the topic but still little practical application, with most of the cases of use of innovative technologies being at an experimental stage. To trigger the change, sharing and networking of operators are essential to activate synergies and start innovation processes. The experiments discussed in the paper helped to create a network of players in the national innovation ecosystem interested and active in the issues of technologies for circularity,

which will take action to promote the identified proposals and strategies at various levels.

#### NOTES

<sup>1</sup> The Enabling Technologies application scenarios derive from literature and from interviews/workshops with stakeholders, and have been integrated by hypotheses of the authors.

<sup>2</sup> The experiences mentioned were the subject of direct interviews and periods of collaboration (Giorgi *et al.*, 2022).

<sup>3</sup> The BAMB project, "Building as Material Banks" (2015-2019) received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, involving fifteen partners from seven different countries, and a dense network of stakeholders.

<sup>4</sup> Interreg NWE 739 Facilitating the Circulation of Reclaimed Building El-

ements (FCRBE) involves the following countries: UK, Ireland; The Netherlands, Belgium and Luxembourg, France.

<sup>5</sup> Project developed by the Vrije Universiteit Brussel (VUB) within the European BAMB project, implemented in 2019.

<sup>6</sup> The SocKETs project, of which AIRI is a partner and in which the authors participate, has received funding from the European Union's Horizon 2020 Framework Program for Research and Innovation, grant agreement no. 958277

## REFERENCES

- Charef R. and Emmitt S. (2021), "Uses of building information modelling for overcoming barriers to a circular economy", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 285, pp. 124854.
- Chauhan C., Parida V. and Dhir A. (2022), "Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises", *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 177, 121508.
- Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKeown C. and McNiff S. (2013), "BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: an analysis", *Automation in Construction*, 36, 145-151.
- EPEA and SundaHus (2017), "Framework for materials passports. BAMB report", available at: <https://www.bamb2020.eu>.
- Giorgi S., Lavagna M. (2022a), "Traceability system to support sustainable reuse and re-manufacturing process", in Talamo (ed.), *Re-manufacturing networks for tertiary architectures. Innovative organizational models towards circularity*, FrancoAngeli, Milano, pp. 227-235.
- Giorgi S., Lavagna M., Wang K., Osmani M., Liu G. and Campioli A. (2022b), "Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices", *Journal of Cleaner Production*, Volume 336.
- Munaro M.R. and Tavares S.F. (2021), "Materials passport's review: challenges and opportunities toward a circular economy building sector", *Built Environment Project and Asset Management*, Vol. 11, pp. 767-782.
- Rau T. and Oberhuber S. (2016), *Material Matters L'importanza della materia*, Edizioni Ambiente, Milano.
- SocKETs Lab italiano (2020). *Mapping of Key Enabling Technologies Innovation Eco-Systems. Circular Economy in the Building and Construction Sector in Italy*, available at: [https://www.airi.it/airi2020/wp-content/uploads/2021/06/SocKETs\\_D1.1\\_Report\\_Airi\\_Final\\_Website.pdf](https://www.airi.it/airi2020/wp-content/uploads/2021/06/SocKETs_D1.1_Report_Airi_Final_Website.pdf)