

ARTICLE INFO

Received	20 March 2023
Revised	08 May 2023
Accepted	11 May 2023
Published	30 June 2023

DIGITALE E CIRCULARITÀ IN EDILIZIA

Le KETs per la gestione degli scarti nell'Unione Europea

DIGITAL AND CIRCULARITY IN BUILDING

KETs for waste management in the European Union

Marina Rigillo, Giuliano Galluccio, Federica Paragliola

ABSTRACT

L'articolo analizza potenzialità e limiti dell'impiego delle tecnologie abilitanti della transizione digitale per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione in edilizia (BIM, GIS, Realtà Virtuale e Aumentata, Fabbricazione Digitale, Blockchain, Internet of Things, Digital Twin, Intelligenza Artificiale) nel contesto dell'Unione Europea. Lo studio adotta il metodo della Scoping Review per restituire gli esiti di una rassegna di letteratura scientifica a partire dal 2016, anno del Primo Piano di Azione Europeo per l'Economia Circolare e del primo Protocollo per la Demolizione Selettiva. I risultati sono classificati per provenienza geografica, anno di pubblicazione, settore disciplinare, numero di citazioni e contenuti. Obiettivo generale del contributo è individuare apporti originali, scientificamente validati, per perfezionare ulteriori linee di ricerca nella relazione tra tecnologie digitali e cultura della circolarità nel settore delle costruzioni.

The article analyses the potential and limitations of using enabling technologies of the digital transition for construction and demolition waste in construction management (BIM, GIS, Virtual and Augmented Reality, Digital Manufacturing, Blockchain, Internet of Things, Digital Twin, Artificial Intelligence) in the context of the European Union. The study adopts the Scoping Review method to return the outcomes of a scientific literature review since 2016, that is the year of the First European Circular Economy Action Plan and the first Selective Demolition Protocol. The results are classified by geographic origin, year of publication, disciplinary field, number of citations, and content. The overall objective of the contribution is to identify scientifically validated contributions to refine further original lines of research in the relationship between digital technologies and circularity culture in the construction sector.

KEYWORDS

digitalizzazione, tecnologie abilitanti chiave, economia circolare, rifiuti da costruzione e demolizione, scoping review

digitisation, key enabling technologies, circular economy, construction and demolition waste, scoping review

Marina Rigillo, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, 'Federico II' University of Naples (Italy). Her research focuses on the field of environmental and ecological design, with particular attention to the issues of environmental risk, climate adaptation of urban spaces, and reuse and recycling processes of construction and demolition waste. Mob. +39 328/84.73.780 | E-mail: marina.rigillo@unina.it

Giuliano Galluccio, PhD, is a Research Fellow at the Department of Architecture, 'Federico II' University of Naples (Italy). He carries out research activities on the applicability of digital and sustainable processes for decision support in design, with particular reference to the reduction of environmental impacts from construction and demolition interventions on the built heritage. Mob. +39 333/50.12.048 | E-mail: giuliano.galluccio@unina.it

Federica Paragliola, Architect, is a PhD Candidate at the Department of Architecture, 'Federico II' University of Naples (Italy). She conducts research in the field of environmental and ecological design, with a focus on issues related to the management of construction and demolition waste streams in the construction sector. Mob. +39 366/32.05.763 | E-mail: federica.paragliola@unina.it



I recenti indirizzi della Commissione Europea in materia di economia circolare hanno determinato un'importante richiesta di innovazione rispetto ai metodi e alle prassi operative già consolidate nelle discipline del progetto (European Commission, 2015; 2019; 2020a). Allo scopo di indirizzare il settore delle costruzioni verso un design a 'zero rifiuti' (Baratta, 2021), la strategia europea promuove nuove filiere circolari in edilizia e l'approvvigionamento sostenibile di materie prime, anche attraverso l'adozione delle KETs (tecnologie abilitanti chiave) digitali – BIM, GIS, Realtà Virtuale e Aumentata, Fabbricazione Digitale, Blockchain, Internet of Things, Digital Twin, Intelligenza Artificiale (Pimponi and Porcari, 2020) – nei processi di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D; European Commission, 2020b).

Il progresso dei processi e delle tecnologie della transizione digitale (Bernstein, 2018; Chaillou, 2022) amplia infatti le possibilità dell'azione progettuale, consentendo di prefigurare fin dalle prime fasi del progetto una gestione virtuosa del ciclo di vita degli interventi e degli edifici (Cays, 2017; Russo Ermolli, 2020). Analogamente l'estensione del concetto di 'urban mining' all'ambiente costruito definisce nuovi obiettivi prestazionali per la fase di fine vita dell'edificio, e segnatamente quelli della produzione di Materia Prima Seconda (Cosu Salieri and Bisinella, 2012; Ghosh, 2020), il riutilizzo, il riciclo e l'upcycling dei rifiuti (Baiani and Altamura, 2018, 2019; Sposito and Scalisi, 2020). Tali obiettivi richiedono la programmazione di una fase di conoscenza funzionale a qualificare i flussi di materia e lo stock di prodotti derivanti dall'intervento, allo scopo di anticipare e gestire i rischi di insuccesso derivanti dai vincoli di carattere tecnico, normativo ed economico che tali operazioni comportano (Rigillo and Giammetti, 2021).

Tuttavia l'approccio operativo delineato dalla Economia Circolare per il settore delle costruzioni – sintetizzato nel protocollo Level(s) (European Commission, 2018) – resta ancorato a metodi sostanzialmente empirici, sottovalutando i vantaggi connessi all'impiego di processi data-driven per la gestione integrata di flussi materici e dello stock di prodotti.

Il presente contributo si propone pertanto di restituire lo stato dell'arte della letteratura scientifica sul rapporto tra digitalizzazione e circolarità nel settore delle costruzioni attraverso una Scoping Review (Daudt, van Mossel and Scott, 2013) effettuata su database Scopus. Lo studio si focalizza, in particolare, su quattro domande di ricerca: Quale impatto hanno avuto le direttive comunitarie in materia di transizione ecologica e digitale? Quale tecnologia è individuata come la più efficace e perché? Quali limiti e quali barriere sono identificate come le più rilevanti? Quali possibili ambiti di ricerca sono identificati come i più validi da perseguire e per quali ragioni?

La review comprende articoli pubblicati in Unione Europea a partire dal 2016, anno dell'entrata in vigore del Primo Piano di Azione Europeo per l'Economia Circolare (European Commission, 2015) e del Protocollo per la Demolizione Selettiva (European Commission, 2016), riconosciuto dagli Autori come il primo tentativo di avanzamento verso l'economia circolare a livello comunitario (Fig. 1). Gli esiti dello studio evidenziano che, a fronte di una consistente produzione di 'letteratura grigia', la comunità scientifica della Unione Europea risulta

poco coinvolta nella ricerca sul tema rispetto ad altri competitors globali quali Cina, Stati Uniti, Australia e Regno Unito. I dati ottenuti rivelano, inoltre, una scarsa partecipazione delle discipline dell'Architettura e del Design al corpus della produzione scientifica, rispetto ad altri settori disciplinari quali quelli dell'ingegneria e delle scienze ambientali.

L'articolo si struttura in cinque paragrafi: 'Ricerche precedenti e aspetti di originalità del contributo' in cui si restituisce una rassegna critica degli studi considerati fondativi per l'impostazione della ricerca; 'Metodologia e limiti della ricerca', in cui si illustra la metodologia adottata, riconoscendo e discutendo le specificità dell'approccio; la sezione 'Risultati' restituisce gli esiti dello studio; e nella 'Discussione dei risultati' si esaminano gli esiti del lavoro alla luce degli obiettivi fissati. Infine nelle 'Conclusioni' si propone una riflessione, sottolineando le criticità riscontrate e le possibili prospettive di avanzamento della ricerca.

Ricerche precedenti e aspetti di originalità del contributo

Lo stato dell'arte sul rapporto tra digitalizzazione e circolarità in edilizia non presenta un corpus critico in grado di restituire la complessità e le molteplici possibilità offerte dall'introduzione delle KETs nel settore delle costruzioni (Tabella 1). L'analisi preliminare, realizzata per indirizzare le procedure automatizzate di review, ha permesso di verificare l'esistenza di due filoni principali: il primo relativo all'utilizzo delle tecnologie BIM nel cantiere edilizio e il secondo prevalentemente riferito allo sviluppo delle ricerche sul tema dell'Urban Mining.

Nel primo caso la rassegna di letteratura prodotta da Schamne, Nagalli e Vieira Soeiro (2022) focalizza l'analisi sull'impiego di procedure automatizzate basate sul BIM all'interno del cantiere di costruzione e demolizione, dal 2009 al 2020; i risultati rivelano che la maggior parte delle pubblicazioni provengono da Regno Unito, Stati Uniti e Cina. Di queste la quasi totalità si concentra esclusivamente sulle potenzialità delle tecnologie digitali nella fase di progettazione preliminare, senza dettagliare il resto la filiera. Analogamente, gli studi di Ismail (2022) rivolgono l'attenzione, negli esiti, sulle principali barriere all'utilizzo del BIM indicando, nell'insufficiente interoperabilità dei software e nell'assenza di indicatori standardizzati per la gestione della fase di cantiere, le principali criticità da risolvere.

Sul tema dell'Urban Mining e della digitalizzazione la rassegna di Aldebei e Dombi (2021) insiste sulla necessità di dispositivi digitali per migliorare per la stima quantitativa delle risorse impiegate nel settore edilizio. A tal fine Aldebei e Dombi confrontano l'impiego di tecnologie BIM, GIS, di Intelligenza Artificiale e Machine Learning, sottolineando come tali strumenti siano in grado di ridurre drasticamente tempi e oneri delle operazioni di quantificazione analitica dei costi di ciascuna lavorazione e, al tempo stesso, facilitino il governo dei flussi di risorse su scala territoriale, migliorando i processi decisionali.

Con riferimento agli studi analizzati, la Tabella 1 è finalizzata a dichiarare gli elementi di originalità del presente studio: i criteri di perimetrazione del contesto scientifico della ricerca; la scelta del termine a quo della review (2016); l'ambito geografico di riferimento (Unione Europea); il riferimento all'ecosistema digitale delle KETs, piuttosto che

l'analisi di un'unica tecnologia (Fig. 2). Un ulteriore elemento di originalità del contributo è l'utilizzo della Scoping Review. Questa metodologia di review è infatti finalizzata a definire un framework di riferimento che possa essere di indirizzo per le ricerche future, sia attraverso l'integrazione con altri database (o con l'interpolazione di più fonti), sia implementando la ricerca alla luce di future disponibilità di processi e tecnologie.¹

Metodologia e limiti della ricerca | Lo studio è condotto sul database web Scopus, secondo il metodo della Scoping Review, una metodologia di ricerca di tipo esplorativo e meta-analitica che lavora su base statistica e consente di 'mappare' la produzione scientifica in un determinato ambito tematico (Arksey and O'Malley 2005). La ricerca punta a individuare i concetti chiave, le teorie e le evidenze scientifiche atte a informare la ricerca applicata (Grant and Booth, 2009) oppure, nel caso in cui l'oggetto di indagine sia particolarmente complesso o poco studiato, elementi di conoscenza tali da costituire avanzamenti scientifici di per sé. I principali obiettivi della Scoping Review sono l'identificazione di possibili lacune all'interno del perimetro di ricerca analizzato e la messa in evidenza di ulteriori ambiti di indagine, valutando in termini dimensionali la letteratura disponibile (Fig. 3).

Sulla base di tale premessa la presente ricerca ha esaminato le pubblicazioni europee comprese in un arco temporale che va dal 2016 al 2022. La metodologia impiegata per la raccolta di dati in Scopus fa riferimento al sistema di ricerca per stringhe di testo: ai termini relativi ai rifiuti da costruzione e demolizione, così come a quelli relativi alle KETs, sono stati attribuiti campi semantici tali da garantire la massima restituzione quantitativa dei sintagmi, in considerazione delle diverse forme, per esteso o per acronimo, con le quali vengono comunemente indicati. Sono state effettuate otto ricerche, tutte aventi in comune la stringa riferita ai rifiuti da costruzione e demolizione di volta in volta associata ad altra stringa relativa a una specifica tecnologia abilitante.

Sono stati inclusi nella ricerca solo documenti in lingua inglese rientranti nelle categorie di articolo scientifico, volume, capitolo di volume, escludendo ulteriori review di letteratura, brevetti, lettere e atti di convegno. La metodologia delineata ha previsto l'analisi di ogni singola tecnologia separatamente, in modo da ottenere un approfondimento dedicato che, di contro, tende a escludere eventuali utilizzi sinergici di più tecnologie.

Ulteriori limiti riguardano la scelta delle parole chiave e l'impiego di un singolo database. Alcune ricerche analoghe precedenti sommano, infatti, esiti provenienti da più database di ricerca (Web of Science, Google Scholar). Si è scelto, tuttavia, di adoperare unicamente il database Scopus, sia per la sua riconosciuta attendibilità (Guerrero-Bote et alii, 2021) sia per rendere più semplicemente verificabile e ripetibile la metodologia qui utilizzata. Il presente studio limita il campo di ricerca ai Paesi dell'Unione Europea in quanto confrontabili per condizioni inerenti alla struttura normativa, alle strategie di sviluppo industriale in essere e alle possibilità di finanziamento delle ricerche. Con riferimento all'approccio adottato si afferma, inoltre, che l'analisi qualitativa ha preso in esame solo i contributi con il maggior numero di citazioni.

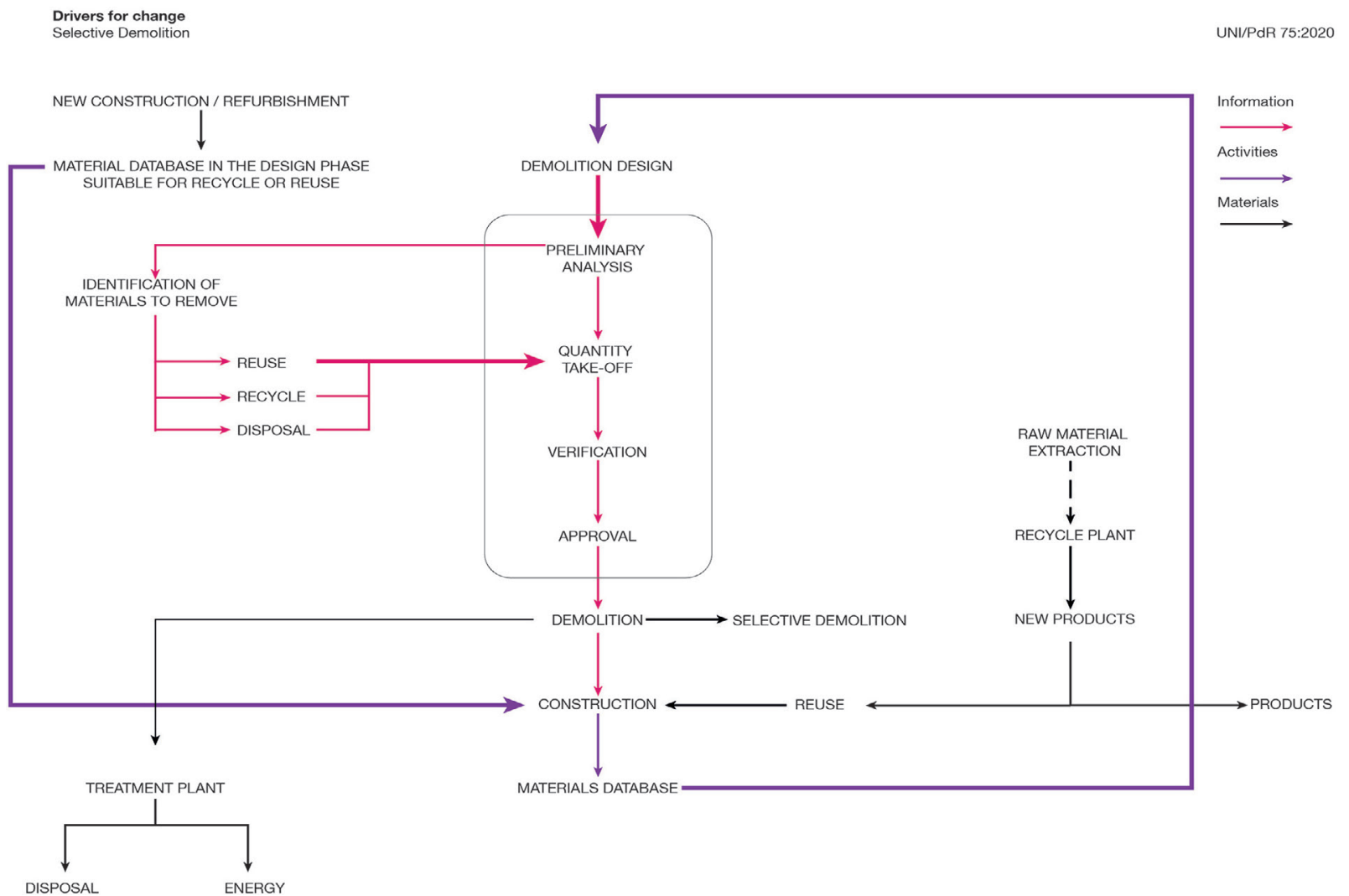


Fig. 1 | Selective demolition process (source: UNI/PdR 75:2020, processed by the Authors, 2023).

Risultati | La ricerca ha restituito 62 contributi sull'utilizzo delle KETs nel settore delle costruzioni (Tabella 2). Dal punto di vista quantitativo, per ognuna delle otto stringhe di ricerca sono stati analizzati: numero di pubblicazioni per ogni anno (Fig. 4); provenienza geografica delle pubblicazioni (Fig. 5); disciplina di appartenenza (Fig. 6); numero di citazioni per ogni pubblicazione (Fig. 7-10); parole chiave più utilizzate (Fig. 11). In linea generale i risultati mostrano che il maggior numero di contributi è stato pubblicato nel 2021, in Olanda, Portogallo e Italia, in ambiti disciplinari principalmente riconducibili all'ingegneria e alle scienze ambientali.

Per la stringa 'a' (BIM), tra gli articoli più citati si segnala quello di Koutamanis, van Reijn e van Bueren (2018) che analizza le possibilità offerte dal BIM per interventi di Urban Mining, incentrati prevalentemente sul recupero di elementi metallici presenti negli edifici residenziali ad Amsterdam. Per la stringa 'b' (GIS) si segnala il contributo di Heeren e Hellweg (2018) che prende in esame differenti scenari per la gestione dei flussi di rifiuti da costruzione e demolizione in modalità 'ciclo chiuso', proponendo un approccio di modellazione che consente di analizzare i flussi e le riserve di materiali edilizi nel tempo e nello spazio, molto utile a superare i limiti dei precedenti modelli edilizi 'bottom-up'.

Per la stringa 'c' (Realtà Virtuale e / o Aumen-

tata) non sono stati trovati contributi afferenti al settore delle costruzioni. Per la stringa 'd' (Fabbricazione Digitale) Suci et alii (2022) propongono un algoritmo di classificazione che facilita l'identificazione e la selezione del rifiuto da costruzione e demolizione. Sulla base delle informazioni acquisite dal nastro trasportatore, grazie all'integrazione dell'Intelligenza Artificiale e dei robot, l'algoritmo consente di classificare i materiali in gruppi specifici e posizzarli in contenitori appositi in cantiere. Tiedemann et alii (2021) propongono un sistema robotico per separare autonomamente i materiali riciclabili grossolani dai rifiuti ingombranti. La soluzione proposta utilizza le attrezzature pesanti, già in uso, piuttosto che strumenti da sviluppare ex novo.

Per la stringa 'e' (Blockchain) la ricerca nel database restituisce un unico articolo pubblicato da Voorter e Koolen (2021), posizionato nel campo delle scienze ambientali e sociali. Gli studiosi olandesi analizzano la procedura di tracciabilità dei flussi di scarti da costruzione e demolizione nelle Fiandre, valutando il contributo della tecnologia blockchain per ottenere catene di approvvigionamento più 'robuste', una migliore gestione dei dati e per veicolare il settore verso una più agevole transizione alla circolarità. Per la stringa 'f' (Internet of Things), non risultano studi pubblicati.

Per la stringa 'g' (Digital Twin) solo due articoli sono stati pubblicati dal 2016 in Europa, di cui

uno è a sua volta una review di letteratura. Meža et alii (2021) presentano attività volte a generare un gemello digitale di una strada totalmente realizzata con Materia Prima Seconda. Per la stringa 'h' (Intelligenza Artificiale), Ferreira et alii (2021) si focalizzano sull'impatto determinato dall'utilizzo di aggregati riciclati nella produzione di malte a base di cemento e calce, con un focus sulle caratteristiche fisiche e meccaniche delle stesse. L'analisi impiega tecniche di modellazione statistica che includono algoritmi di Machine Learning per ottenere una maggiore precisione e affidabilità dei dati raccolti e analizzati.

Discussione degli esiti | Gli esiti dello studio confermano le ipotesi poste a base del lavoro. Nonostante gli sforzi normativi prodotti in ambito comunitario, il rapporto tra digitale e circolarità è in effetti ancora poco indagato nell'Unione Europea, soprattutto nelle discipline dell'Architettura. Nell'ambito delle tecnologie analizzate il BIM e il GIS sono presenti in maniera apprezzabile negli studi inerenti alla gestione dei rifiuti da C&D, con una prevalenza del BIM probabilmente a causa degli obblighi normativi per la digitalizzazione degli appalti pubblici (European Parliament and the Council, 2014). Pur non registrando numeri particolarmente rilevanti, l'approfondimento dell'analisi qualitativa condotta sulle tecnologie di Intelligenza Artificiale e Machine Learning lascia pre-

Authors	Title	Year	Source engine	KETs	Time considered	Region of study
Z. B. Ismail	A critical study of the existing issues in circular economy practices during movement control order: Can BIM fill the gap?	2022	Web of Science Scopus	BIM ICTs RFID AI	-	Malaysia
N. Elshaboury A. Al-Sakkaf E. A. Abdelkader G. Alfalah	Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis	2022	Scopus	-	2001-2021	-
A. N. Schamne A. Nagalli A. A. Viera Soeiro	The use of BIM to automated construction and demolition waste management: A literature review from 2009 to 2020	2022	Scopus	BIM	2009-2020	Brazil
O. A. Soyinka, M. J. Wadu, U. W. A. Hewage T. O. Oladinnin	Scientometric review of construction demolition waste management: A global sustainability perspective	2022	Web of Science	-	2000-2021	-
D. Han, M. Kalantari A. Rajabifard	Building Information Modeling (BIM) for Construction and Demolition Waste Management in Australia: A Research Agenda	2021	Web of Science	BIM Point cloud	1998-2021	Australia
J. A. Mesa, C. E. Fúquene, A. Maury-Ramírez	Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste: A Systematic Literature Review	2021	Scopus Google Scholar	AI BIM	-	-
F. Aldebei M. Bombi	Mining the Built Environment: Telling the Story of Urban Mining	2021	Scopus Web of Science Google Scholar	BIM GIS AI	-	-
A. Akbarieh, L. B. Jayasinghe D. Waldmann F. N. Teferle	BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review	2020	Scopus Web of Science	BIM LCA AI	2003-2019	-

Tab. 1 | Comparative analysis of reference Literature Reviews (credit: the Authors, 2023).

sagire interessanti scenari di approfondimento.

I risultati dell'indagine possono essere interpretati attraverso il filtro dei diversi livelli di complessità che caratterizzano le KETs esaminate, oltre che alla luce della tradizionale riluttanza del settore delle costruzioni verso l'innovazione tecnologica (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016). Va inoltre specificato che l'interoperabilità delle diverse piattaforme digitali per l'edilizia non è ancora completamente efficiente, così come risultano carenti le banche dati organizzate a livello territoriale, che potrebbero viceversa consentire una gestione più efficace delle risorse provenienti dalle attività di costruzione e demolizione, in un'ottica circolare (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

A una prima lettura il limitato numero di risultati rilevati nel contesto della Unione Europea potrebbe scoraggiare ulteriori ricerche sul tema, tuttavia il riscontro che si ottiene osservando il quadro nei contesti di Cina, Stati Uniti, Australia e Regno Unito (che pure condividono con la Unione Europea un alto livello di innovazione tecnologica), lascia pensare che tali differenze siano da imputare a questioni normative, più che a capacità tecniche. Questi contesti, infatti, presentano una struttura tecnica e normativa meno vincolante di quella Europea, che favorisce la sperimentazione tecnologica nei processi di riciclo, riuso e re-design: si segnalano, a titolo di esempio, gli studi condotti in Cina sull'implementazione di tecnologie di fab-

bricazione digitale a partire da residui da costruzione e demolizione, in particolar modo aggregati inerti di calcestruzzo (Xiao et alii, 2020).

Conclusioni e sviluppi futuri | L'impegno per un'economia circolare in Europa nel settore delle costruzioni è senza dubbio un fattore qualificante della politica comunitaria, tuttavia, a fronte di aspettative molto rilevanti, soprattutto in termini di sviluppo industriale, si osserva che l'edilizia è ancora un ambito tecnologicamente arretrato, organizzato prevalentemente in PMI, con grandi difficoltà a intraprendere la transizione digitale verso standard di prestazione più avanzati e verso l'attuazione di processi sostenibili.

L'analisi condotta dallo studio conferma la presenza di tre principali fattori di criticità: la capacità di gestione delle risorse naturali e dei rifiuti; l'adozione di metodologie basate sulla simulazione dei processi; l'investimento nel design delle filiere. Inoltre, e più decisamente, il focus si va progressivamente spostando verso la necessità di orientare la ricerca in modo più complesso, puntando a un ripensamento dei processi produttivi in edilizia, capace di tenere insieme innovazione di prodotto e di progetto.

Numerose risultano, infatti, le barriere alla completa implementazione di un simile approccio nella Unione Europea; con riferimento al caso italiano, ad esempio, ai sensi della normativa vigente, le

attività di recupero e di trattamento di rifiuti possono essere esercitate solo a valle di un complesso iter autorizzativo che, per il carattere restrittivo delle norme, determina un allungamento dei tempi, l'aumento dei costi di intervento e un maggior rischio di insuccesso. Analogamente, i criteri normativi sul processo di recupero del rifiuto da demolizione (Decreto Ministero Transizione Ecologica del 27/09/2022, n. 152)² non tengono conto della destinazione d'uso dei materiali riciclati che, in questo modo, vengono ricondotti a una generica definizione di MPS le cui caratteristiche, non essendo tarate sui futuri effettivi usi, finiscono col dover rispondere a requisiti prestazionali molto complessi.

Eppure il reimpiego diretto dei rifiuti da costruzione e demolizione in nuovi tecnocicli dell'edilizia (peraltro in ottemperanza alle direttive CAM – Criteri Ambientali Minimi di cui al Decreto Ministero Transizione Ecologica del 23/06/2022³ in merito alle quantità di materia riciclata da introdurre nei processi di costruzione) ridurrebbe sia le emissioni derivanti dal trasporto a discarica, sia quelle relative alla produzione, al packaging e al trasporto di elementi di nuova realizzazione che i componenti riciclati andrebbero a sostituire.

Risulta evidente il paradosso per cui, nonostante gli indirizzi europei in materia di economia circolare e di appalti pubblici promuovano l'impiego di tecnologie digitali per il riciclo dei rifiuti da

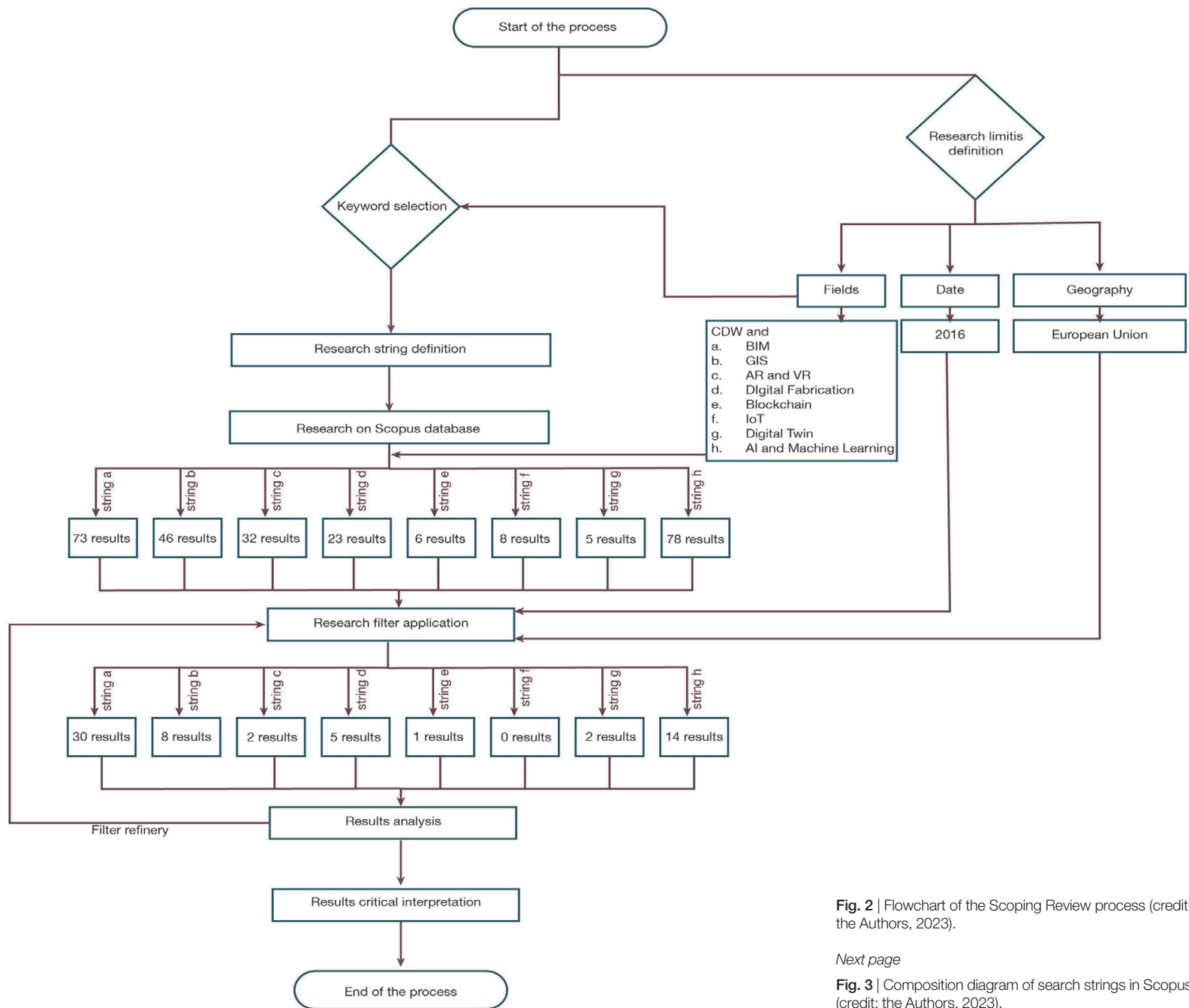


Fig. 2 | Flowchart of the Scoping Review process (credit: the Authors, 2023).

Next page

Fig. 3 | Composition diagram of search strings in Scopus (credit: the Authors, 2023).

costruzione e demolizione, vincoli di carattere legislativo e tecnico ne frenano l'adozione su ampia scala. A ciò vanno certamente aggiunti limiti culturali verso metodi e tecnologie in grado di intervenire a monte dei processi e che richiedono, pertanto, il ridisegno dell'intera filiera e l'adozione di nuovi approcci al progetto e alla sua gestione. Alla luce della complessità intrinseca delle sfide della transizione ecologica e digitale risulta indispensabile intervenire in modo massiccio nella formazione degli attori del settore edilizio, incentivando a un uso più efficace degli strumenti digitali, ma anche a una cultura più matura del lavoro in filiera, promuovendo un'educazione tecnica ed etica, utile tanto ai decisori quanto agli operatori del settore per avviare pratiche di collaborazione e di responsabilità condivisa.

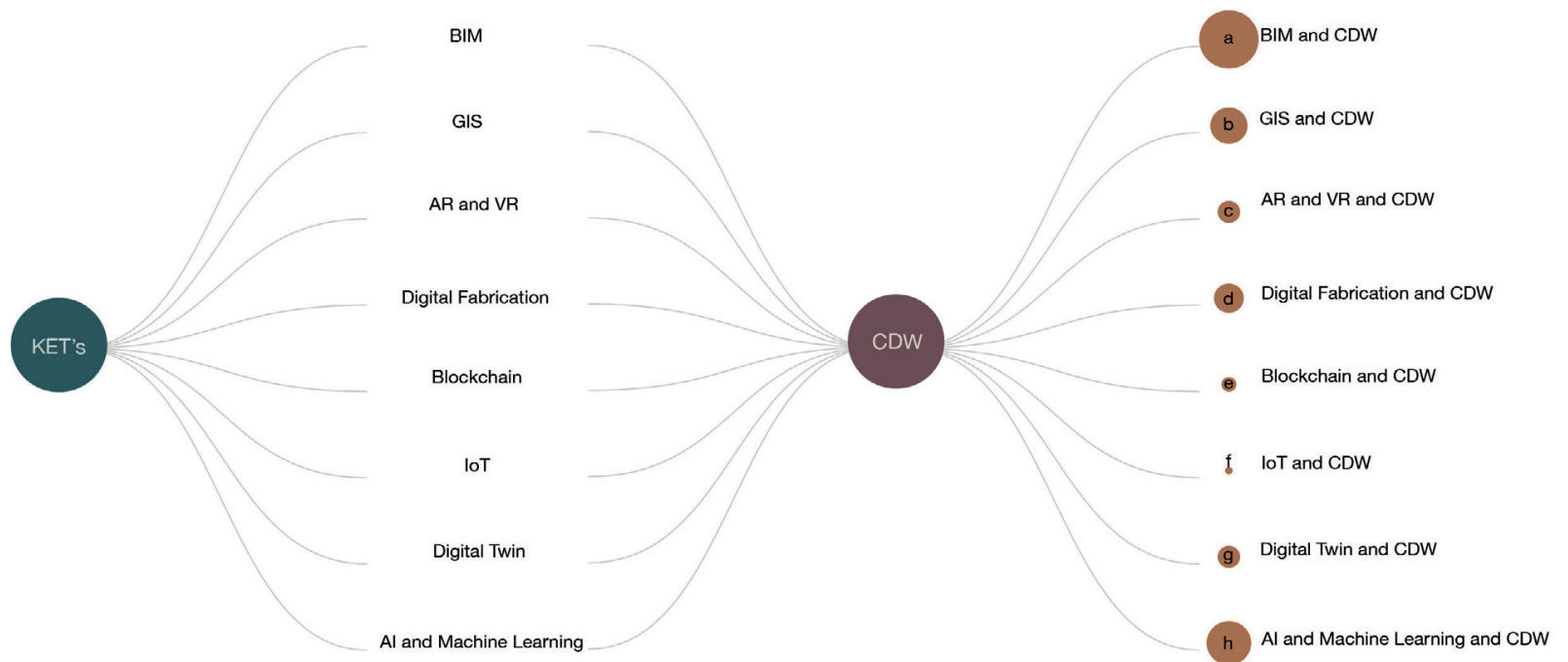
mand for innovation with respect to established methods and operational practices in design disciplines (European Commission, 2015; 2019; 2020a). In order to push the construction sector toward a 'zero-waste' design (Baratta, 2021), the European strategy promotes new circular supply chains in construction, as well as the sustainable sourcing of raw materials, also including the adoption of digital KETs (key enabling technologies) in construction and demolition (C&D) waste management processes (European Commission, 2020b); BIM, GIS, Virtual and Augmented Reality, Digital Fabrication, Blockchain, Internet of Things, Digital Twin, Artificial Intelligence (Pimponi and Porcari, 2020).

In fact, the increasing automation in the processes and technologies of the digital transition (Bernstein, 2018; Chaillou, 2022) expands the possibilities of design action, making it possible to prefigure a virtuous management of the building's life cycle from the earliest stages of the project (Cays, 2017; Russo Ermolli, 2020). Similarly, the extension of the concept of 'urban mining' to the

built environment defines new performative objectives for the end-of-life phase of the building, namely those of Secondary Raw Material production (Cossu Salieri and Bisinella, 2012; Ghosh, 2020), reuse, recycling and upcycling of waste (Baiani and Altamura, 2018, 2019; Sposito and Scalisi, 2020). These objectives require the planning of an essential knowledge phase to qualify the material flows and the stock of products resulting from demolition to anticipate and manage the risks of failure arising from the technical, regulatory, and economic constraints involved in such operations (Rigillo and Giammetti, 2021).

However, the operational approach outlined by the Circular Economy for the construction sector – summarised in the Level(s) protocol (European Commission, 2018) – is still grounded in essentially empirical methods, so that the benefits associated with the use of data-driven processes for the integrated management of material flows and product stock. This paper, therefore, aims to return the state of the art of the scientific literature

The European Commission's recent guidelines on the circular economy have led to an essential de-



on the relationship between digitisation and circularity in the construction sector through a Scoping Review (Daudt, van Mossel and Scott, 2013) conducted on Scopus databases. The study focuses, in particular, on four research questions: What impact have the EU directives had on the ecological and digital transition? Which technology is identified as the most effective and why? What limitations and barriers are recognised as the most relevant? What possible research areas are recognised as the most valuable to pursue and why?

The review includes articles published in the European Union since the introduction of the First European Action Plan for the Circular Economy (European Commission, 2015) and the Protocol for Selective Demolition (European Commission, 2016), acknowledged by the authors as the first attempt to advance the circular economy at the European Union level (Fig. 1). Despite the huge production of grey literature in the EU, the study highlights the European Union to be a little involved in this research topic if compared to other global competitors such as China, the United States, Australia and the United Kingdom. The research outcomes also reveal a low participation of the disciplines of Architecture and Design in the body of scientific production, if compared to other disciplinary fields such as engineering and environmental sciences.

The paper is structured into five sections: 'Previous research and aspects of originality of the contribution' in which a critical review of the studies considered foundational for the research setting is returned; 'Methodology and limitations of the research', where the methodology adopted is explained, recognising and discussing the specifics of the approach; the 'Results' section returns the outcomes of the study; and in the 'Discussion of outcomes' the findings of the work are examined in light of the objectives set. Finally, in the 'Conclusions' a reflection is offered, highlighting the critical issues encountered and possible perspectives for the advancement of the research.

Previous research and aspects of originality of the contribution | The state of the art on the relationship between digitisation and circularity in construction does not present a critical corpus capable of restoring the complexity and multiple possibilities offered by introducing KETs in the construction sector (Table 1). The preliminary analysis, carried out to address the automated review procedures, allowed us to verify the existence of two main strands: the first related to the use of BIM technologies in the construction site, and the second mainly related to the development of research on Urban Mining.

In the first case, the literature review produced by Schamne, Nagalli and Vieira Soeiro (2022) focuses on analysing the use of automated BIM-based procedures within the construction and demolition site from 2009 to 2020. The results reveal that most publications come from the United Kingdom, the United States, and China. Of these, almost all focus exclusively on the potential of digital technologies in the preliminary design phase without detailing the rest of the supply chain. Similarly, Ismail's (2022) studies bring attention in their outcomes to the main barriers to the use of BIM, pointing to insufficient software interoperability and the absence of standardised indicators for managing the construction phase as the main critical issues to be resolved.

On Urban Mining and Digitisation, the Aldebei and Dombi's (2021) review focuses on the need for digital devices to improve for quantitative estimation of resources used in the construction industry. To this end, Aldebei and Dombi compare the use of BIM, GIS, Artificial Intelligence, and Machine Learning technologies, emphasising how such tools can drastically reduce the time and burden of analytical quantification operations of the costs of each processing and, at the same time, facilitate the governance of resource flows on a spatial scale, improving decision-making processes.

Concerning the analysed studies, Table 1 is aimed at stating the elements of originality of the present study: the criteria for the perimeter of the scientific context of the research; the choice of the

term a quo of the review (2016); the geographical scope of reference (European Union); and the reference to the digital ecosystem of KETs, rather than the analysis of a single technology (Fig. 2). A further element of originality in the contribution is the use of scoping review. Indeed, this review methodology aims to define a framework that can serve as a guideline for future research either through integration with other databases (or by interpolating multiple sources) or by implementing research in light of future process and technology availability.¹

Methodology and limitations of the research | The study is conducted on the Scopus web database using the Scoping Review method; it is an exploratory, meta-analytic research methodology that works on a statistical basis and allows for the 'mapping' of scientific production in a given subject area (Arksey and O'Malley 2005). Scoping aims to identify key concepts, theories and scientific evidence that are likely to inform applied research (Grant and Booth, 2009) or, where the subject of investigation is particularly complex or understudied, such that they constitute scientific advances in their own right. The main objectives of the scoping review are to identify possible gaps within the scope of the research being analysed and highlight additional areas for investigation by assessing the available literature in dimensional terms (Fig. 3).

Based on this premise, the present research reviewed European publications included in a period from 2016 to 2022. The methodology employed for data collection in Scopus refers to the text string search system: terms related to construction and demolition waste, as well as those related to KETs, were assigned semantic fields such as to ensure maximum quantitative restitution of the syntagmas, in view of the different forms, by full or acronym, by which they are commonly referred to. Eight searches were carried out, all having the string referring to construction and demolition waste in common, from time to time associated with a string related to a specific enabling technology.

String	No. publication EU	No. publication extra EU	Yr of most publication EU	Geography of publication EU	Geography of publication extra EU	Subject of most publication EU	Most cited by EU
a. CDW and BIM	30	38	2021	Italy (5) Netherlands (5) Portugal (5) Egypt (4) Spain (4)	China (10) Australia (9) United Kingdom (8) United States (8) Hong Kong (5)	Engineering	53
b. CDW and GIS	8	29	2020	Austria (2) Portugal (2) Switzerland (2) Hungary (1) Italy (1) Luxembourg (1) Netherlands (1) Romania (1)	China (12) Australia (5) Brazil (4) United States (3) Hong Kong (3) Lebanon (3)	Environmental Science	98
c. CDW and AR and VR	2	5	2021 2022	Greece (1) Sweden (1)	Argentina (4) China (2) United States (1)	Chemistry Physics Astronomy	2
d. CDW and Digital Fabrication	5	11	2020 2021	Romania (3) Germany (1) Sweden (1)	China (5) Hong Kong (3) Russian Federation (2) Canada (1) Malaysia (1) South Korea (1) Taiwan (1)	Computer Science	3
e (CDW and Blockchain)	1	5	2021	Belgium (1)	Australia (2) Brazil (2) China (1) India (1)	Environmental Science Social Sciences	3
f. CDW and IoT	0	7	-	-	-	-	-
g. CDW and AI and Machine Learning	2	3	2020 2021	Luxembourg (1) Slovenia (1)	Canada (5) Hong Kong (3) Thailand (2) United Kingdom (1)	Business, Management and Accounting Computer Science Economics, Econometrics and Finance Energy Engineering Environmental Science Social Sciences	42
h. CDW and GIS	14	49	2021	Germany (5) France (2) Romania (2) Denmark (1) Hungary (1) Netherlands (1) Portugal (1) Sweden (1)	China (18) Australia (6) United States (6) South Korea (5) Brazil (4) Hong Kong (4) India (4) Canada (3) Saudi Arabia (3) Thailand (3) United Kingdom (2) Bahrain (1) Japan (1) Pakistan (1) Poland (1) Russian Federation (1) Taiwan (1) Turkey (1) Vietnam (1)	Engineering	140

Tab. 2 | Summary of data from quantitative analysis (credit: the Authors, 2023).

Only English-language papers falling into the categories of scientific article, volume, and volume chapter were included in the search, excluding additional literature reviews, patents, letters, and conference proceedings. The methodology outlined involved analysing each technology separately to obtain a dedicated in-depth study that, conversely, tends to exclude possible synergistic uses of multiple technologies.

Additional limitations relate to the choice of keywords and the use of a single database. In-

deed, some previous similar research summarises outcomes from multiple research databases (Web of Science, Google Scholar). However, we chose to use only the Scopus database, both for its recognised reliability (Guerrero-Bote et alii, 2021) and to make the methodology used here more verifiable and repeatable. The present study limits the scope of the search to European Union countries as they are comparable in terms of conditions inherent to regulatory structure, existing industrial development strategies, and research funding

opportunities. Concerning the approach taken, it is also stated that the qualitative analysis examined only those contributions with the highest number of citations.

Results | The search returned 62 contributions on using KETs in the construction industry (Table 2). Quantitatively, for each of the eight search strings, the following were analysed: number of publications for each year (Fig. 4); geographic origin of publications (Fig. 5); discipline to which they be-

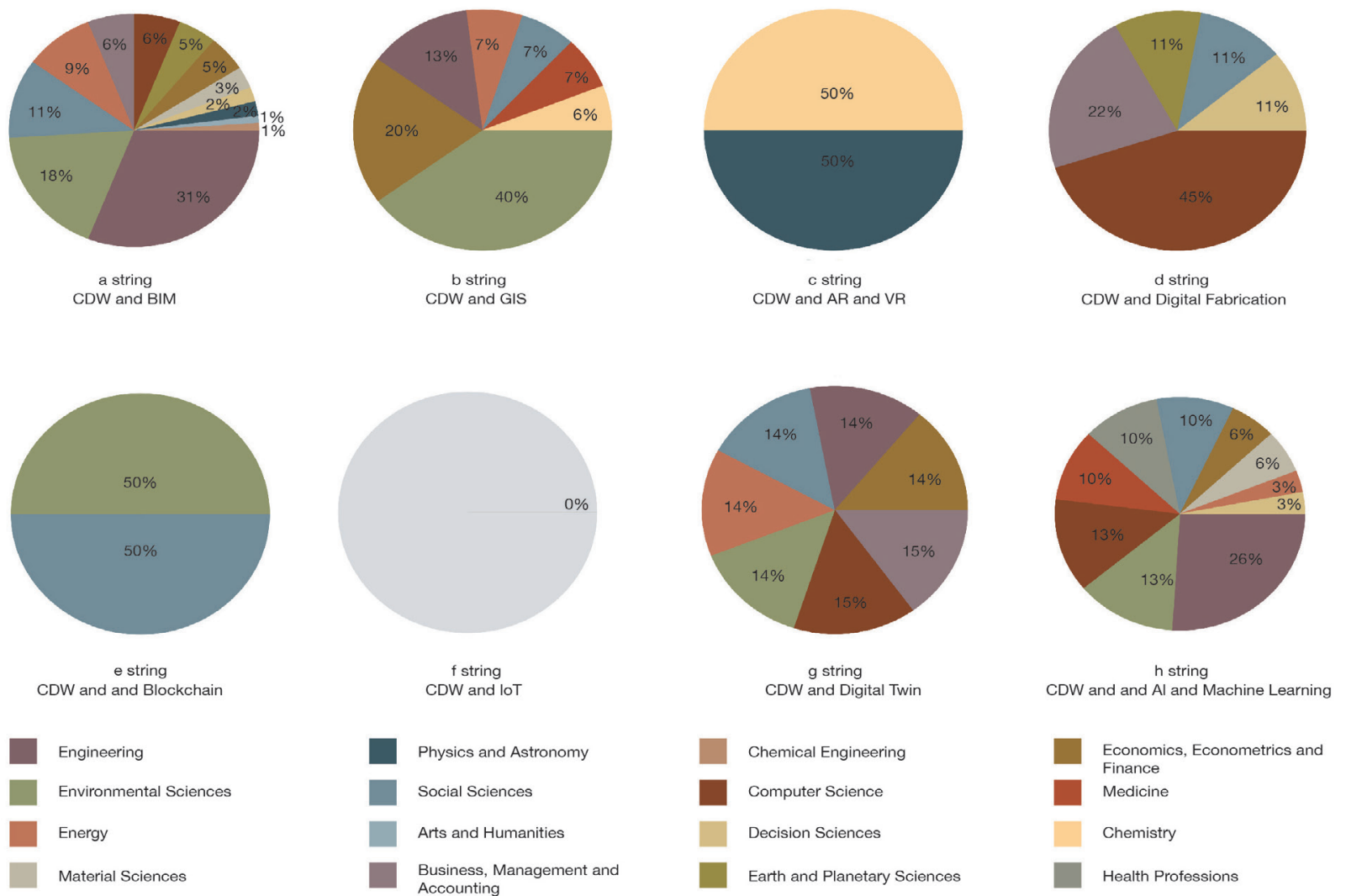


Fig. 6 | Disciplinary fields of affiliation of publications, divided by research string (credit: the Authors, 2023).

lecting construction and demolition waste. Based on the information acquired from the conveyor belt, the algorithm allows materials to be classified into specific groups and placed in special containers at the construction site through the integration of Artificial Intelligence and robots. Tiedemann et alii (2021) propose a robotic system to separate coarse recyclables from bulky waste autonomously. The proposed solution uses heavy equipment already in use rather than tools to be developed from scratch.

For string 'e' (Blockchain), a database search returns a single article published by Voorter and Koolen (2021) and positioned in the environmental and social sciences field. The Dutch scholars analyse the traceability procedure of construction and demolition waste streams in Flanders, evaluating the contribution of blockchain technology to achieve more 'robust' supply chains and better data management and to channel the sector toward a smoother transition to circularity. For string 'f' (Internet of Things), no published studies are reported.

For string 'g' (Digital Twin), only two articles have been published since 2016 in Europe, one of which is a literature review. Meža et alii (2021) present activities aimed at generating a digital twin of a road totally made with Secondary Raw Material. For string 'h' (Artificial Intelligence), Ferreira et alii (2021) focus on the impact of recycled

aggregates in the production of cement and lime-based mortars, focusing on their physical and mechanical characteristics. The analysis employs statistical modelling techniques, including Machine Learning algorithms, to achieve greater accuracy and reliability of the collected and analysed data.

Discussion of outcomes | The study's outcomes confirm the hypotheses posed as the basis of the work. Despite the regulatory efforts produced, the relationship between digital and circularity is indeed still poorly investigated in the European Union, especially in the disciplines of Architecture. Within the KETs, BIM and GIS are appreciably present in studies related to C&D waste management, with a prevalence of BIM probably due to regulatory obligations for the digitisation of public procurement (European Parliament and the Council, 2014). While recording relatively small numbers, the in-depth qualitative analysis conducted on Artificial Intelligence and Machine Learning technologies portends engaging scenarios for further study.

The survey results can be interpreted through the filter of the different levels of complexity that characterise the KETs examined and in light of the construction sector's traditional reluctance toward technological innovation (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016). It should also be specified that the interoperability of the various

digital platforms for construction is not yet fully efficient, just as spatially organised databases, which could conversely enable more effective management of resources from construction and demolition activities, in a circular perspective, are lacking (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

On a first reading, the limited number of results found in the European Union context might discourage further research on the topic. However, the feedback from looking at the picture in the contexts of China, the United States, Australia and the United Kingdom (which also share a high level of technological innovation with the European Union) suggests that these differences can be attributed to regulatory issues rather than technical capabilities. These contexts, in fact, have a less constraining technical and regulatory structure than the European one, which favours technological experimentation in recycling, reuse and re-design processes. Examples include studies conducted in China on implementing digital fabrication technologies from construction and demolition residues, especially aggregate concrete aggregates (Xiao et alii, 2020).

Conclusions and future developments | Commitment to a circular economy in Europe in the construction sector is undoubtedly a qualifying factor of EU policy. However, in the face of very significant expectations, especially in terms of industrial

development, it is observed that construction is still a technologically backward field, organised mainly in SMEs, with great difficulties in undertaking the digital transition to more advanced performance standards and the implementation of sustainable processes.

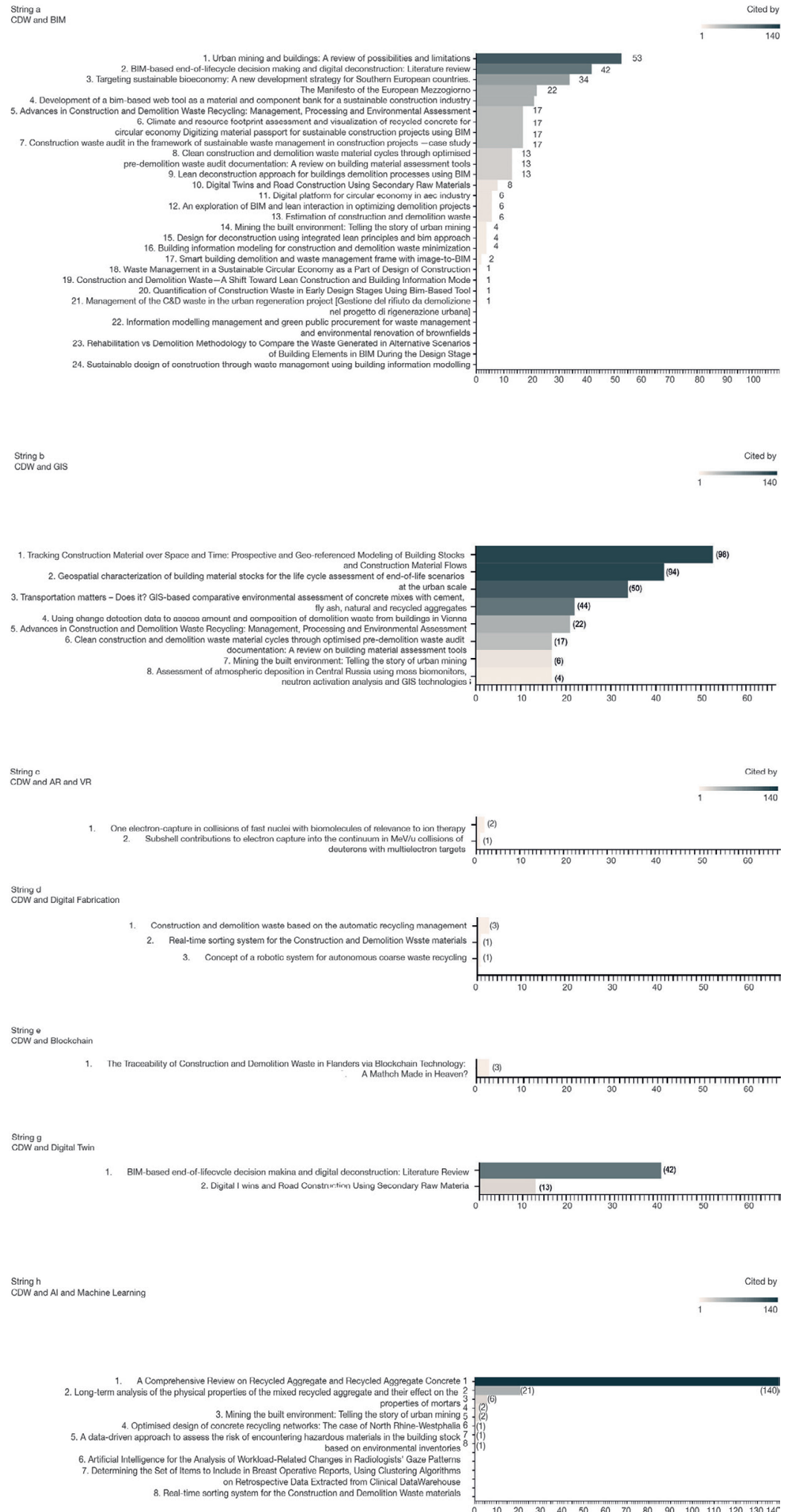
The analysis conducted by the study confirms the presence of three main critical factors: natural resource and waste management capacity; adoption of methodologies based on process simulation; and investment in supply chain design. In addition, and more decisively, the focus is gradually shifting toward the need to orient research in a more complex way, aiming at rethinking production processes in construction, capable of holding product and design innovation together.

In fact, barriers to the full implementation of such an approach in the European Union are many. As for the Italian case, waste recovery and treatment activities can only be carried out downstream of a complex authorisation process under the current regulations. In fact, the restrictive nature of the regulations results in longer timeframes, increased intervention costs and a greater risk of failure. Similarly, the regulatory criteria on the recovery process of demolition waste (Italian Ministry Decree Ecological Transition of 09/27/2022, No. 152)² do not take into account the intended use of recycled materials; in this way, these latter are brought back to a generic definition of MPS whose characteristics, do not fit with the actual future uses, so that they must comply with many and very complex performance requirements.

Yet, the direct reuse of construction and demolition waste in new construction technocycles would reduce both emissions from transportation to landfills and those related to the production, packaging and transportation of newly manufactured elements that the recycled components would replace (moreover, in compliance with the CAM – Minimum Environmental Criteria directives set forth in the Italian Ministry Decree for Ecological Transition of 23/06/2022³ regarding the quantities of recycled material to be introduced in construction processes). A paradox emerges between constraints and intentions: despite European guidelines on the circular economy boost boost for applying digital technologies in recycling construction and demolition waste, the current EU regulation reduces the opportunities to extend this practices into the construction sector. Cultural constraints must undoubtedly be added toward methods and technologies that can intervene upstream of processes and therefore require the redesign of the entire supply chain and the adoption of new approaches to the project and its management.

In light of the inherent complexity of the challenges of the ecological and digital transition, it is imperative to operate massively in the training of actors in the construction sector, providing incentives for more effective use of digital tools but also for a more mature culture of work in the supply chain, promoting technical and ethical education, useful for both decision-makers and practitioners to initiate practices of collaboration and shared responsibility.

Fig. 7-10 | Number of citations received by the identified publications for each search string (credits: the Authors, 2023).



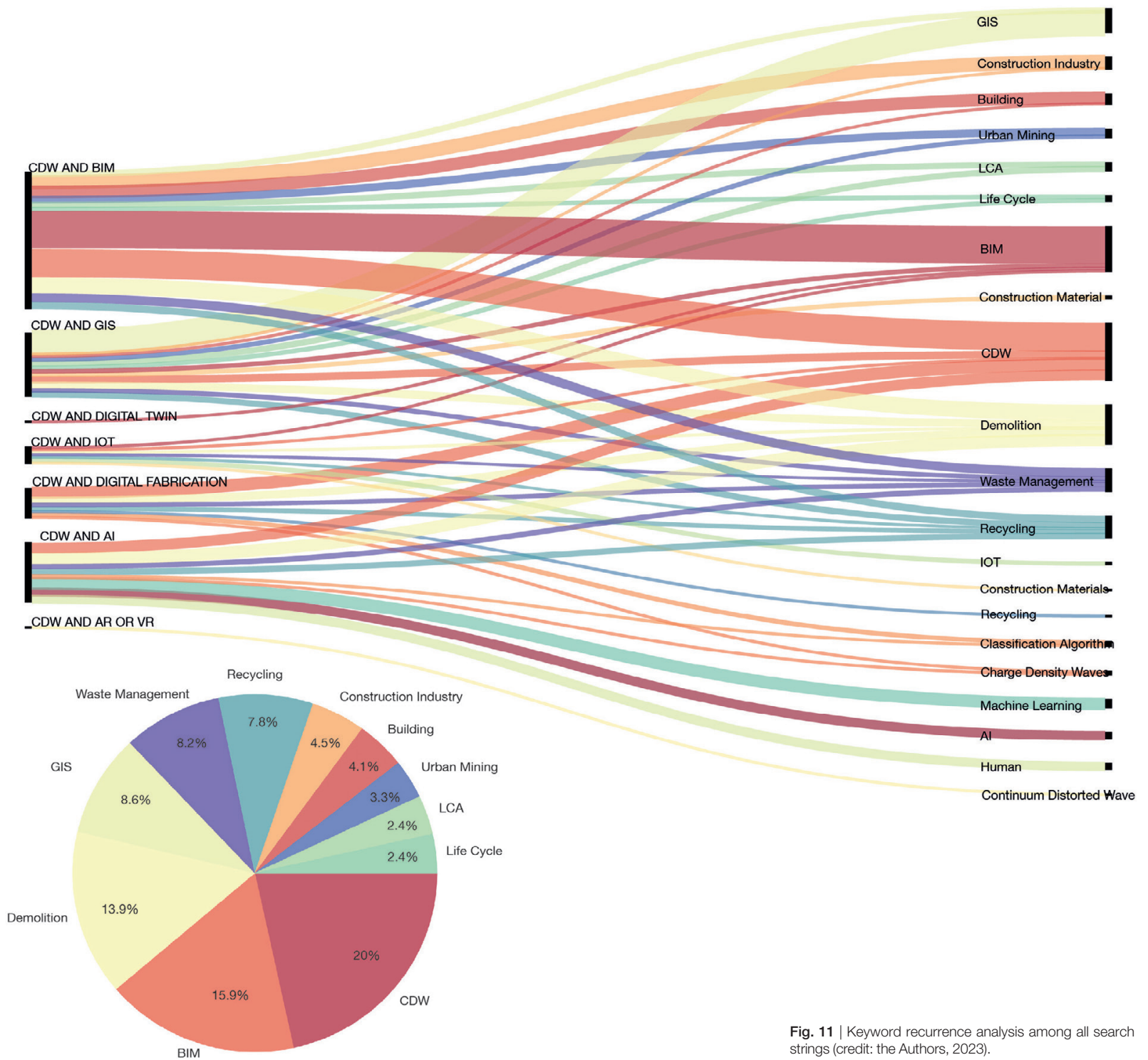


Fig. 11 | Keyword recurrence analysis among all search strings (credit: the Authors, 2023).

Acknowledgements

The contribution is the result of a common reflection of the Authors. Notwithstanding this, the introductory paragraph and ‘Conclusions and future developments’ are attributed to M. Rigillo, the paragraphs ‘Methodology and limitations of the research’ and ‘Discussion of outcomes’ to G. Galluccio, and the paragraphs ‘Previous research and aspects of originality of the contribution’ and ‘Results’ to F. Paragliola, who also took care of data management and image production. The research was financed by the Campania Region, as part of the research project PROSIT – PROgettare in Sostenibilità – Qualification and Digitization in Building’, PO FESR 2014-2020 – Specific Objectives 1.2.1 – Expression of Interest for the ‘realisation of technological platforms un-

der the program agreement – High-tech districts, aggregations and public-private laboratories for the strengthening of the scientific and technological potential of the Campania Region’, assigned to STRESS S.c.a.r.l. Project partners involved in the activity include the Department of Architecture and the Department of Structures for Engineering and Architecture of the ‘Federico II’ University of Naples, the public-private consortium STRESS S.c.a.r.l. and the City of Naples.

Notes

- 1) For more information, see: libguides.uta.edu/ScopingReviews/RQs [Accessed 11 May 2023].
- 2) For more information on Italian Decree No. 152 of September 27, 2022 – ‘Regolamento che disciplina la ces-

sazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell’articolo 184-ter, comma 2, del Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 (22G00163)’, published in Gazzetta Ufficiale Serie Generale No. 246 of 20-10-2022, see: gazzettaufficiale.it/eli/gu/2022/10/20/246/sg/pdf [Accessed 11 May 2023].

3) For more information on Italian Decree June 23, 2022 – ‘Criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l’affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l’affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi (22A04307)’, published in Gazzetta Ufficiale Serie Generale No. 183 of 06-08-2022, see: gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg [Accessed 11 May 2023].

References

- Agarwal, R., Chandrasekaran, S. and Sridhar, M. (2016), "Imaging construction's digital future", in *McKinsey.com*, 24/06/2016. [Online] Available at: mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future [Accessed 11 May 2023].
- Aldebei, F. and Dombi, M. (2021), "Mining the Built Environment – Telling the Story of Urban Mining", in *Buildings*, vol. 11, issue 9, article 388, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings11090388 [Accessed 10 May 2023].
- Arksey, H. and O'Malley, L. (2005), "Scoping studies – Towards a methodological framework", in *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8, issue 1, pp. 19-32. [Online] Available at: doi.org/10.1080/136455703200119616 [Accessed 10 May 2023].
- Baiani, S. and Altamura, P. (2019), "Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/592019 [Accessed 10 May 2023].
- Baiani, S. and Altamura, P. (2018), "Superuse e upcycling dei materiali di scarto in architettura – Progetto e sperimentazione | Waste materials superuse and upcycling in architecture – Design and experimentation", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 142-151. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23035 [Accessed 10 May 2023].
- Baratta, A. F. L. (2021), "Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti | From resource circularity policies to the zero-waste strategy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 32-41. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/932021 [Accessed 10 May 2023].
- Bernstein, P. (2018), *Architecture, Design, Data – Practice Competency in the Era of Computation*, Birkhäuser, Basel.
- Cays, J. (2017), "Life-Cycle Assessment – Reducing environmental impact risk with workflow data you can trust", in *Architectural Design*, vol. 87, issue 3, pp. 96-103. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ad.2179 [Accessed 10 May 2023].
- Chaillou, S. (2022), *Artificial Intelligence and Architecture – From Research to Practice*, Birkhäuser, Basel.
- Cossu, R., Salier, V. and Bisinella, V. (2012), "Introduction – The Urban Mining Concept", in Cossu, R., Salier, V. and Bisinella, V. (eds), *Urban Mining – A global cycle approach to resource recovery from solid waste*, CISA, Padova, pp. 13-20.
- Daudt, H. M., van Mossel, C. and Scott, S. J. (2013), "Enhancing the scoping study methodology – A large, inter-professional team's experience with Arksey and O'Malley's framework", in *BMC Med Res Methodology*, vol. 13, issue 48, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1186/1471-2288-13-48 [Accessed 10 May 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2015), *Delivering the Circular Economy – A Toolkit for Policy Makers*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Policy-makerToolkit.pdf [Accessed 04 May 2023].
- European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, 98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN [Accessed 10 May 2023].
- European Commission (2020b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0662 [Accessed 10 May 2023].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the Implementation of the Circular Economy Action Plan*, document 52019DC0190, 190 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0190 [Accessed 10 May 2023].
- European Commission (2018), *A background to Level(s) and overview of the testing phase*. [Online] Available at: environment.ec.europa.eu/publications/background-levels-and-overview-testing-phase_en [Accessed 10 May 2023].
- European Commission (2016), *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. [Online] Available at: ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/en/renditions/native [Accessed 10 May 2023].
- European Commission (2015), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the loop – An EU Action Plan for the Circular Economy*, document 52019DC0190, 614 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614 [Accessed 10 May 2023].
- European Parliament and the Council (2014), *Directive 2014/24/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC – Text with EEA relevance*, document 32014L0024. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/24/oj [Accessed 10 May 2023].
- Ferreira, R. L. S., Anjos, M. A. S., Maia, C., Pinto, L., de Azevedo, A. R. G. and de Brito, J. (2021), "Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars", in *Construction and Building Materials*, vol. 274, article 121796, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121796 [Accessed 10 May 2023].
- Guerrero-Bote, V. P., Chinchilla-Rodríguez, Z., Mendoza, A. and de Moya-Aneón, F. (2021), "Comparative Analysis of the Bibliographic Data Sources Dimensions and Scopus – An Approach at the Country and Institutional Levels", in *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, vol. 5, article 593494, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3389/frma.2020.593494 [Accessed 10 May 2023].
- Ghosh, S. K. (ed.) (2020), *Urban Mining and Sustainable Waste Management*, Springer Nature, Singapore. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-15-0532-4 [Accessed 10 May 2023].
- Grant, M. J. and Booth, A. (2009), "A typology of reviews – An analysis of 14 review types and associated methodologies", in *Health Information and Libraries Journal*, vol. 26, issue 2, pp. 91-108. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x [Accessed 10 May 2023].
- Heeren, N. and Hellweg, S. (2018), "Tracking Construction Material over Space and Time – Prospective and Georeferenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, issue 1, pp. 253-267. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12739 [Accessed 10 May 2023].
- Ismail, Z.-A. B. (2022), "A critical study of the existing issues in circular economy practices during movement control order – Can BIM fill the gap?", in *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. ahead-of-print, n. ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/ECAM-08-2021-0676 [Accessed 10 May 2023].
- Koutamanis, A., van Reijn, B. and van Bueren, E. (2018), "Urban mining and buildings – A review of possibilities and limitations", in *Resources Conservation and Recycling*, vol. 138, pp. 32-39. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024 [Accessed 10 May 2023].
- Meža, S., Mauko Pranjić, A., Vezočnik, R., Osmokrović, I. and Lenart, S. (2021), "Digital Twins and Road Construction Using Secondary Raw Materials", in *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, article 8833058, pp. 1-
12. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2021/8833058 [Accessed 10 May 2023].
- Pimponi, D. and Porcari, A. (2020), *Circular economy in the building and construction sector in Italy – Towards sustainable production and consumption*, SocKETs project. [Online] Available at: airi.it/airi2020/wp-content/uploads/2021/06/SocKETs_D1.1_Report_Airi_Final_Website.pdf [Accessed 10 May 2023].
- Rigillo, M. and Giammetti, M. T. (2021), "Gestione del rifiuto da demolizione nel progetto di rigenerazione urbana | Management of the C&D waste in the urban regeneration project", in *Techne | Journal of Technology and Environment*, vol. 22, pp. 240-248. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-10615 [Accessed 10 May 2023].
- Russo Ermolli, S. (2020), *The Digital Culture of Architecture – Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RN).
- Schamne, A. N., Nagalli, A. and Vieira Soeiro, A. A. (2022), "The use of BIM to automated construction and demolition waste management – A literature review from 2009 to 2020", in *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, vol. 9, issue 21, pp. 377-394. [Online] Available at: [doi.org/10.21438/rbgas\(2022\)092124](https://doi.org/10.21438/rbgas(2022)092124) [Accessed 10 May 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), "Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8102020 [Accessed 10 May 2023].
- Suciu, G., Petre, I., Iordache, G. V., Ionel, T. and Simionescu, S. (2022), "Classification algorithm of an automated sorting system for Construction and Demolition Waste materials", in *21st RoEduNet Conference – Networking in Education and Research (RoEduNet), Sovata, September 15-16, 2022*, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.1109/RoEduNet57163.2022.9921053 [Accessed 10 May 2023].
- Tiedemann, T., Keppner, M., Runge, T., Vögele, T., Wittmaier, M. and Wolff, S. (2021), "Concept of a Robotic System for Autonomous Coarse Waste Recycling", in Gusikhin, O., Nijmeijer, H. and Madani, K. (eds), *Proceedings of the 18th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2021), July 6-8, 2021*, ScitePress, Setúbal, pp. 493-500. [Online] Available at: doi.org/10.5220/0010584004930500 [Accessed 10 May 2023].
- UNI/PdR 75 (2020), *Decostruzione selettiva – Metodologia per la decostruzione selettiva e il recupero dei rifiuti in un'ottica di economia circolare | Selective deconstruction – Methodology for selective deconstruction and waste recovery from a circular economy perspective*. [Online] Available at: bauschutt.it/media/9af07049-6542-494a-9f3f-49a743d64595/uni21001058-eit.pdf [Accessed 10 May 2023].
- Voorter, J. and Koolen, C. (2021), "The Traceability of Construction and Demolition Waste in Flanders via Blockchain Technology – A Match Made in Heaven?", in *Journal for European Environmental and Planning Law*, vol. 18, issue 4, pp. 347-369. [Online] Available at: doi.org/10.1163/18760104-18040003 [Accessed 10 May 2023].
- Xiao, J., Zou, S., Yu, Y., Wang, Y., Ding, T., Zhu, Y., Yu, J., Li, S., Duan, Z., Wu, Y. and Li, L. (2020), "3D recycled mortar printing – System development, process design, material properties and on-site printing", in *Journal of Building Engineering*, vol. 32, article 101779, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2020.101779 [Accessed 10 May 2023].