

Roberto Giordano<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6640-548X>

Jacopo Andreotti<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4370-4150>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Roma Tre, Italia

roberto.giordano@polito.it  
jacopo.andreotti@uniroma3.it

**Abstract.** Le iniziative avviate a valle dell'Accordo sul Clima di Parigi, così come il lavoro di revisione della Direttiva EPBD, hanno come obiettivo lo sviluppo una roadmap per la transizione energetica e la decarbonizzazione del settore delle costruzioni, entro il 2050. In tale ambito è stata sviluppata la ricerca "Strumenti per la Decarbonizzazione", finanziata da *Green Building Council* Italia, e parte del progetto Europeo #BuildingLife, che prevede di definire un set di indicatori attraverso cui contabilizzare le emissioni di CO<sub>2</sub> in diverse fasi del ciclo di vita di un manufatto e di valutare la *Whole Life Carbon*, ovvero, l'impronta complessiva di carbonio dello stesso manufatto.

**Parole chiave:** *Building Life Cycle; Embodied & Operational Carbon; Decarbonisation; Whole Life Carbon.*

## La strada verso la Decarbonizzazione

Il programma di ricerca Strumenti per la Decarbonizzazione (DEC50) si sviluppa all'interno di un contesto politico e culturale noto, quello dell'Accordo di Parigi, entrato in vigore nel novembre 2016, firmato da 195 Paesi e ratificato da 190, a partire da gennaio 2021.

La Conferenza delle Parti di Parigi (COP 21) è stata anche l'occasione per un più ampio coinvolgimento, rispetto al passato, di *stakeholders*, operanti in ambiti socioeconomici eterogenei, e rappresentanti di interessi pubblici e privati. Tale coinvolgimento ha portato alla nascita di numerose iniziative, non ultima la fondazione della GlobalABC (*Global Alliance for Buildings and Construction*) la cui finalità è definire soluzioni per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione per il settore edilizio (GlobalABC, 2020). L'importanza della GlobalABC è da ricondurre al ruolo strategico che i manufatti edilizi avranno nei prossimi anni, in ragione delle emissioni di anidride carbonica equivalente (CO<sub>2</sub>eq) che rilasciano in atmosfera in diverse fasi del loro

## DEC50: Building decarbonisation tools

**Abstract.** The initiatives launched downstream of the Paris Climate Agreement, as well as the work on the revision of the EPBD Directive, have as their primary objective the development of a roadmap for the energy transition and decarbonisation of the construction sector by 2050. The research "Tools for Decarbonization" was developed in this context. Green Building Council Italia has funded it and is part of the European project #BuildingLife. The study plans to define a set of indicators to account for CO<sub>2</sub> emissions in different stages of the building's lifecycle, and to assess the *Whole Life Carbon* of the building itself, i.e., its overall carbon footprint.

**Keywords:** *Building Lifecycle; Embodied & Operational Carbon; Decarbonisation; Whole Life Carbon.*

ciclo di vita e alla crescente esigenza di nuove abitazioni, connessa all'aumento demografico a scala planetaria.

Tra in numerosi documenti elaborati dalla GlobalABC è opportuno menzionare la Guida per l'integrazione di azioni di mitigazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nei *Nationally Determined Contributions* (NDCs) e la *Global Road Map*, suddivisa per continenti, che stabilisce i potenziali percorsi verso manufatti a zero emissioni.

I contenuti della *Global Road Map* sono stati condivisi e implementati in ambito Europeo e Nazionale, definendo scenari subordinati a diversi livelli di sviluppo: economico, sociale e tecnologico e ad altrettante condizioni climatiche. In particolare, l'Unione Europea si è prefissata un percorso di neutralità climatica articolato (UE, 2021) che include: la pianificazione urbana, la realizzazione di edifici nuovi e il retrofit di quelli esistenti, la gestione delle risorse per la climatizzazione dei manufatti edilizi, la selezione dei materiali da costruzione e l'implementazione delle fonti rinnovabili. Di indubbio interesse è il lavoro di revisione della Direttiva sul Rendimento Energetico degli Edifici (EPBD) (COM, 2021). La proposta, inerente alla transizione energetica, prevede un cambio di paradigma rispetto al passato, introducendo la valutazione delle emissioni di gas a effetto serra nel ciclo di vita degli edifici, a partire da quelli nuovi e dal 2030. Ciò significa che il processo di calcolo non si concentrerà sulle sole emissioni, denominate *Operational Carbon* (OC), associate alla fase operativa, ma su emissioni, denominate *Embodied Carbon* (EC), riferite alle fasi di produzione, costruzione e fine vita.

## The road to decarbonisation

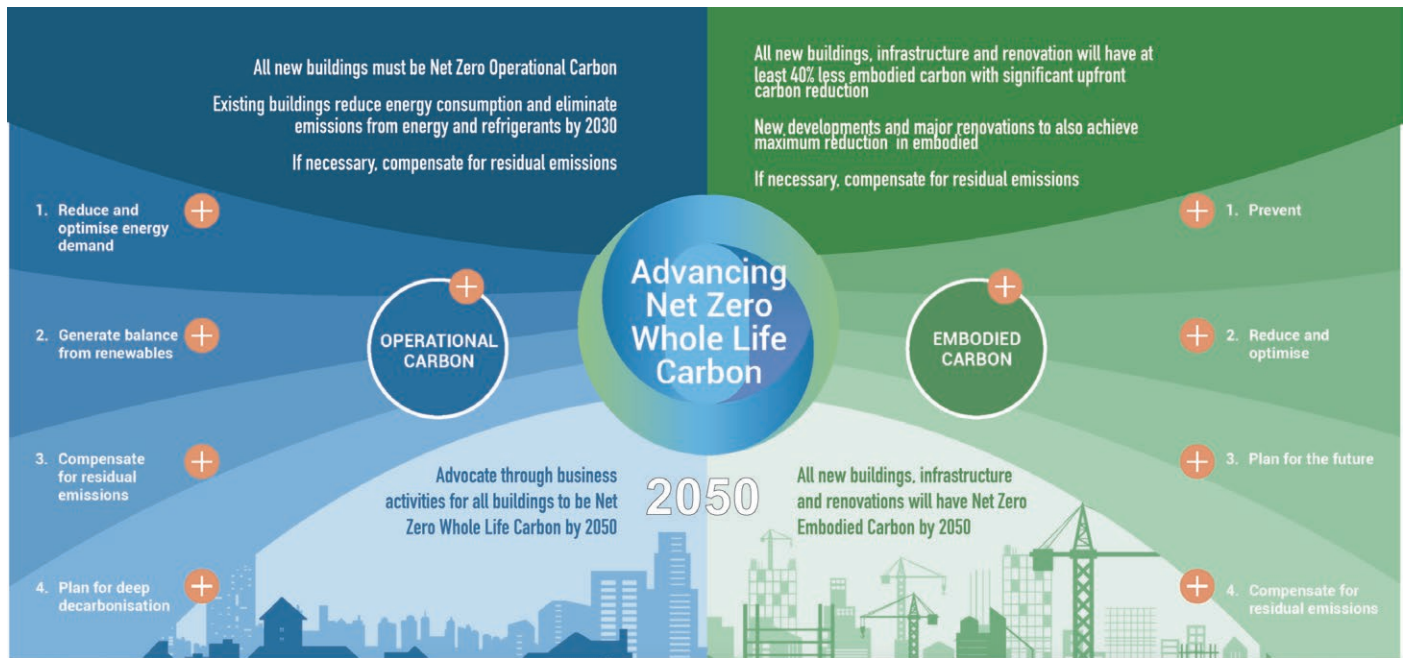
The research programme Tools for Decarbonization (DEC50) was set out and developed within the widely known political and cultural context of the Paris Agreement, which entered into force in November 2016, and was signed by 195 countries. It was subsequently ratified by 190 countries, starting in January 2021.

The Conference of the Parties in Paris (COP 21) was also an opportunity for a broader involvement – than in the past – of stakeholders acting in heterogeneous socio-economic fields and representing both public and private interests. This involvement has led to many initiatives, not least of all the creation of the Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). Its primary purpose is to define strategies and solutions to achieve the decarbonisation goals in the construction sector

(GlobalABC, 2020). The importance of GlobalABC is due not only to the fact that it is an integral part of the United Nations Environment Programme, but also to the strategic role buildings will have in the coming years. Such importance is due to the emissions of carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>eq) the buildings release into the atmosphere at different stages of their lifecycle, and to the growing need for new homes as a result of population growth on a planetary scale.

Among the documents issued by GlobalABC, the Guide for integrating CO<sub>2</sub> mitigation actions in Nationally Determined Contributions (NDCs) and the Global Road Map, divided by continents, establish potential pathways to achieve zero-emission products.

The general contents of the Global Road Map have been shared and im-



Il bilancio tra OC ed EC condurrà a quello che la proposta di Direttiva definisce come *Whole Life Carbon* (WLC), ovvero la somma totale delle emissioni e delle rimozioni di CO<sub>2</sub>eq di un manufatto edilizio, corrispondente a una *cradle-to-grave carbon assesment*.

La convergenza tra metodi e strumenti di calcolo della OC e della EC è illustrata nella figura 1 (Fig. 1) che riassume il programma *Advancing Net Zero* del *World Green Building Council* (WGBC, 2022) che prevede una serie di azioni per l'OC da realizzare, entro il 2030 e, successivamente, entro il 2050, che includono: la massimizzazione dell'efficienza energetica delle soluzioni di impianto; una significativa copertura dei fabbisogni per climatizzazione ed elettricità attraverso fonti rinno-

plemented at the European and national scale, defining appropriate scenarios subordinated to different levels of development: economic, social, and technological, and to as many climates as possible. The European Union has expressly set itself an articulated and complex climate neutrality path (EU, 2021), which includes: urban planning, the construction of new buildings and the retrofit of existing ones, resource optimisation for the air conditioning of buildings, the selection of building materials, and the implementation of renewable sources. The Commission's work on recasting the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) is of undoubted interest (COM, 2021). The proposal concerning the energy transition provides for a paradigm shift compared to the past, introducing the assessment of greenhouse gas emissions in the lifecycle of

buildings, starting with new ones and from 2030. This means that the calculation process will not focus only on emissions, called Operational Carbon (OC), associated with the operational stage, but on emissions to be considered as Embodied Carbon (EC), referring to the production, construction, and end-of-life stages. The balance between OC and EC will lead to what the Directive defines as Whole Life Carbon (WLC), i.e., the total CO<sub>2</sub>eq emissions and removals of a building product, also described as a cradle-to-grave carbon assessment. The merging of OC and EC calculation methods and tools is illustrated in Figure 1 (Fig. 1). It summarises the World Green Building Council's Advancing Net Zero programme (WGBC, 2022). The programme includes a certain number of actions to be carried out by 2030 and by 2050 for the OC, includ-

vabili (prodotte *in-site & off-grid*); l'eliminazione progressiva dell'impiego di fonti fossili. Allo stesso tempo, il programma raccomanda di condurre una contabilizzazione dell'EC del manufatto, selezionando materiali a basse emissioni di CO<sub>2</sub>eq e, ancora, adottando soluzioni in grado di ridurre i potenziali impatti in fase d'uso e nelle fasi di costruzione e demolizione. Per entrambe le categorie di indicatori sono, infine, previste azioni di compensazione delle eventuali emissioni residue.

A livello nazionale il GBC Italia ha condiviso le proposte e i programmi internazionali ed europei attraverso la partecipazione al progetto *#BuildingLife*, finalizzato alla messa a punto di *roadmap* nazionali ed europee per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni (GBC, 2022). La ricerca è stata condot-

ing energy efficiency maximisation of services, coverage of renewable sources for air conditioning and electricity needs (in-site & off-grid production), and fossil fuels phasing out. At the same time, the programme recommends achieving a study to build EC accounts starting from the early design by selecting materials with low CO<sub>2</sub> eq emissions and by adopting solutions that can reduce potential impacts in the usage stage and in the construction and demolition stages. Finally, offsetting actions are planned for both indicators to compensate for residual emissions. Also, at the national level, GBC Italia has shared international and European proposals and programmes through participation in the European project *#BuildingLife*. *#BuildingLife* aimed to develop national roadmaps for decarbonisation

in the construction sector (GBC, 2022) within a global EU roadmap. Research activities were carried out between 2020 and 2022, leading to the development of three projects concerning the resilience of cities, circularity in the construction sector and the decarbonisation of buildings (DEC50).

#### The research "Building Decarbonisation Tools"

The Politecnico di Torino's Technology and Environment research group is a GBC Italian partner in the *#BuildingLife* programme, and has the role of scientific DEC50 research coordination (Andreotti and Giordano, 2023). The research's overall objective is to set out a methodology for EC accounting, harmonised with the OC methodology and aimed at a WLC assessment that is consistent with the international and European technical-scientific

te nel periodo compreso tra il 2020 e il 2022 e ha portato allo sviluppo di tre progetti che riguardano la resilienza delle città, la circolarità nel settore delle costruzioni e la decarbonizzazione degli edifici (DEC50).

### La ricerca “Strumenti per la Decarbonizzazione”

Il gruppo di ricerca Tecnologia e Ambiente del Politecnico di Torino è partner di GBC Italia nell'ambito di #BuildingLife e ha il ruolo di coordinamento scientifico della ricerca DEC50 (Andreotti and Giordano, 2023). L'obiettivo è definire una metodologia di contabilizzazione nazionale dell'EC, complementare a quella dell'OC, e di valutazione finale della WLC, coerente con il quadro tecnico-scientifico internazionale ed europeo. L'approccio ha previsto l'organizzazione di incontri periodici con *stakeholders*, rappresentanti del mondo accademico, delle istituzioni pubbliche e di alcuni settori della produzione edilizia, che hanno valutato i progressi della ricerca, evidenziando le criticità, i punti di forza e contribuendo alla successiva implementazione. La OC determina le emissioni di CO<sub>2</sub>eq di un manufatto, in funzione dei fabbisogni energetici per la climatizzazione, l'illuminazione e l'acqua sanitaria. Mentre l'indicatore l'EC valuta i rilasci, gli stoccaggi, le rimozioni e le eventuali compensazioni di CO<sub>2</sub>eq durante una o più fasi del ciclo di vita dello stesso manufatto. L'unità di misura con cui contabilizzare l'EC e l'OC è la CO<sub>2</sub>eq, ovvero, l'unità in grado di esprimere l'impatto sulla transizione energetica e sul cambiamento climatico di una determinata quantità di gas serra, sia essa CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), protossido di azoto (N<sub>2</sub>O), ecc., rispetto a un equivalente quantitativo di CO<sub>2</sub>. I fattori di conversione dei diversi gas sono

framework. Further, DEC50 should be a reference for the national context. The approach adopted involved the organisation of recurrent meetings. Several stakeholders, representatives of academia, public institutions and some building production sectors, besides sustainability experts evaluated the progress of the research. They highlighted the critical issues and strengths, and contributed to its subsequent implementation. The functional unit to account for EC and OC is CO<sub>2</sub>eq. According to energy transition and climate change targets, such a unit can account for the impact of a given amount of greenhouse gases. This means that methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), etc., are normalised to an equivalent amount of CO<sub>2</sub>. The different gas conversion factors are defined in the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report (IPCC, 2021).

More specifically, the OC calculates the CO<sub>2</sub>eq emissions of a building according to its energy needs for air conditioning, lighting and domestic hot water. In comparison, the EC estimates the releases, storages, removals and any offsets of CO<sub>2</sub>eq during the building's lifecycle. The calculation of emissions as regards OC can be performed using well established certification methods and commonly used tools, such as the Energy Performance Certificates (EPCs). Instead, EC is harder to analyse and verify due to lack of a well defined and binding technical-regulatory framework, especially in some nations (e.g. Italy), and the uncertainty of the data to be used. Overall, DEC50 was divided into two main phases. The first was about defining the methodological aspects characterising the account and evaluation;

definiti nel report IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2021).

Il calcolo delle emissioni associate all'OC è facilitato da strumenti consolidati di certificazione, come l'Attestato di Prestazione Energetica (APE). Al contrario, la contabilizzazione dell'EC è di più difficile analisi e verifica (Pomponi and Moncaster, 2018), in ragione di una mancanza di un quadro tecnico-normativo strutturato e cogente e dell'incertezza dei dati da utilizzare.

La ricerca DEC50 è stata suddivisa in due momenti. Il primo, di definizione degli aspetti caratterizzanti la metodologia di contabilizzazione e di valutazione, il secondo, di predisposizione delle procedure di calcolo, per le diverse fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio, sia esso nuovo, esistente o sottoposto a intervento di ristrutturazione.

### Aspetti metodologici caratterizzanti

La prima parte della ricerca è subordinata allo studio di un elevato numero di documenti tecnici e normativi, per lo più appartenenti alle famiglie UNI EN 14000 e 15000 (Fig. 2). In particolare, DEC50 ha adottato il sistema di classificazione proposto dalla norma UNI EN 15978:2011 (UNI, 2011). La contabilizzazione dell'EC è da ricondurre a fasi che possono essere identificate con i seguenti titoli e codici: Produzione (A1-A3) e Costruzione (A4-A5), Uso (B1-B5) e Fine Vita (C1-C4) (Fig. 3). Alle fasi appena descritte si aggiunge – come elemento indipendente – la fase “oltre il ciclo di vita (D)”: capace di valutare i potenziali benefici e/o impatti relativi a processi circolari di riuso, recupero o riciclo.

the second was setting up the calculation procedures for the building's lifecycle stages, whether new, existing or under renovation.

### Characterising methodological aspects

The first part of the research is to be considered subject to the study of a large number of technical and regulatory reports and standards, mostly belonging to UNI EN 14000 and 15000 clusters (Fig. 2). Particularly, DEC50 has adopted the classification system proposed by the UNI EN 15978: 2011 standard (UNI, 2011). EC accounting must, therefore, be traced back to stages that can be identified with the following titles and numbers: Production (A1-A3) and Construction (A4-A5), Use (B1-B5) and End-of-Life (C1-C4). The stages described above are added to “beyond the lifecycle (D)” as an in-

dependent element. D can estimate the potential benefits and impacts related to circular processes of reuse, recovery or recycling (Fig. 3). The EC must be assumed as a progressive accounting process. Its features vary according to the design process, from early to detailed design. The methodology developed considers the accessibility and type of information available for designers, defining appropriate calculation procedures. In more detail, DEC50 is set apart between the basic and advanced methods (Fig. 4). The first refers to the feasibility study when it is possible to calculate the EC through generic databases (i.e., it relates to generic materials). This method allows an estimation of potential CO<sub>2</sub>eq emissions. The second method enables calculate the EC when the materials are well defined (e.g., many materials featured with an



02 | Principali riferimenti normativi e documenti tecnici. Elaborazione degli autori  
 Main regulatory reports and standards used within DEC50's methodology. Elaboration by the authors

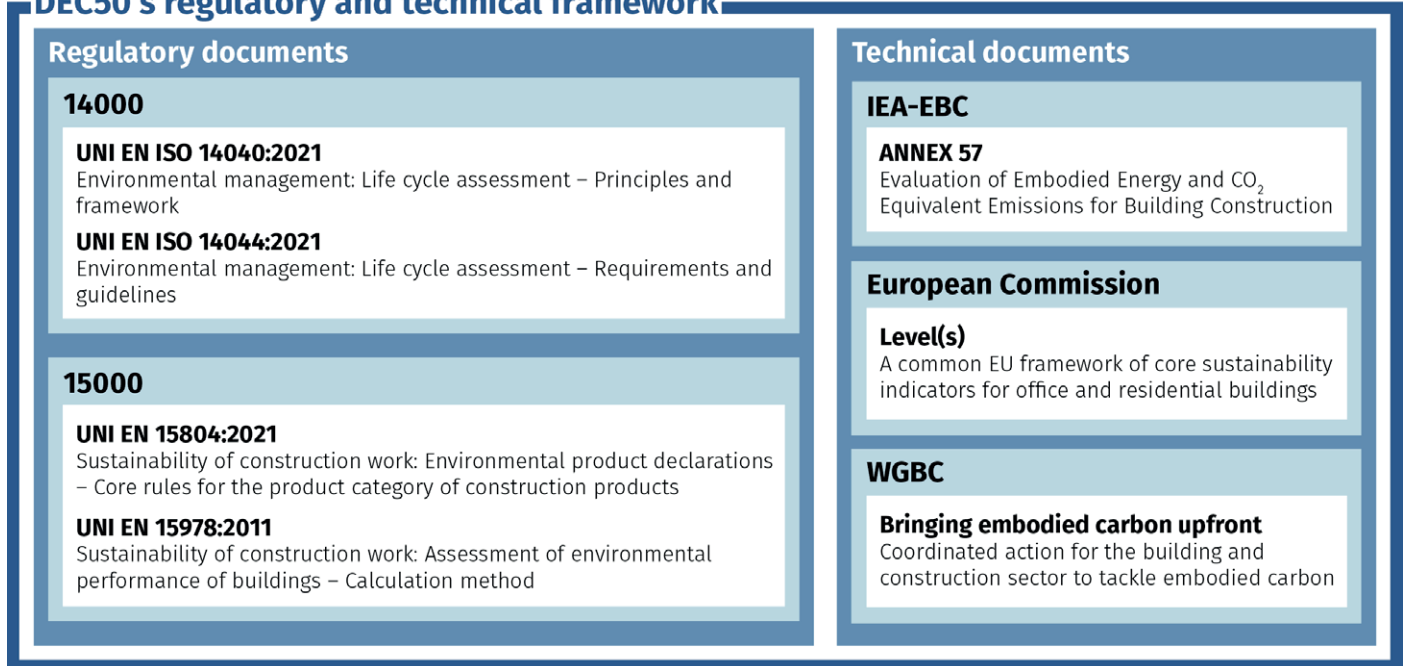
03 | Fasi che caratterizzano il ciclo di vita di un manufatto edilizio. Rielaborazione degli autori da UNI EN 15978:2011  
 Stages that characterise the building's life cycle. Elaboration by the authors from UNI EN 15978: 2011

La metodologia considera la tipologia di informazioni disponibili per progettisti, definendo delle procedure appropriate di calcolo. Più in dettaglio DEC50 opera una distinzione tra metodo base e metodo avanzato (Fig. 4). Nel primo, che si riferisce allo studio di fattibilità, la determinazione dell'EC avviene attraverso banche dati che si riferiscono a generici materiali

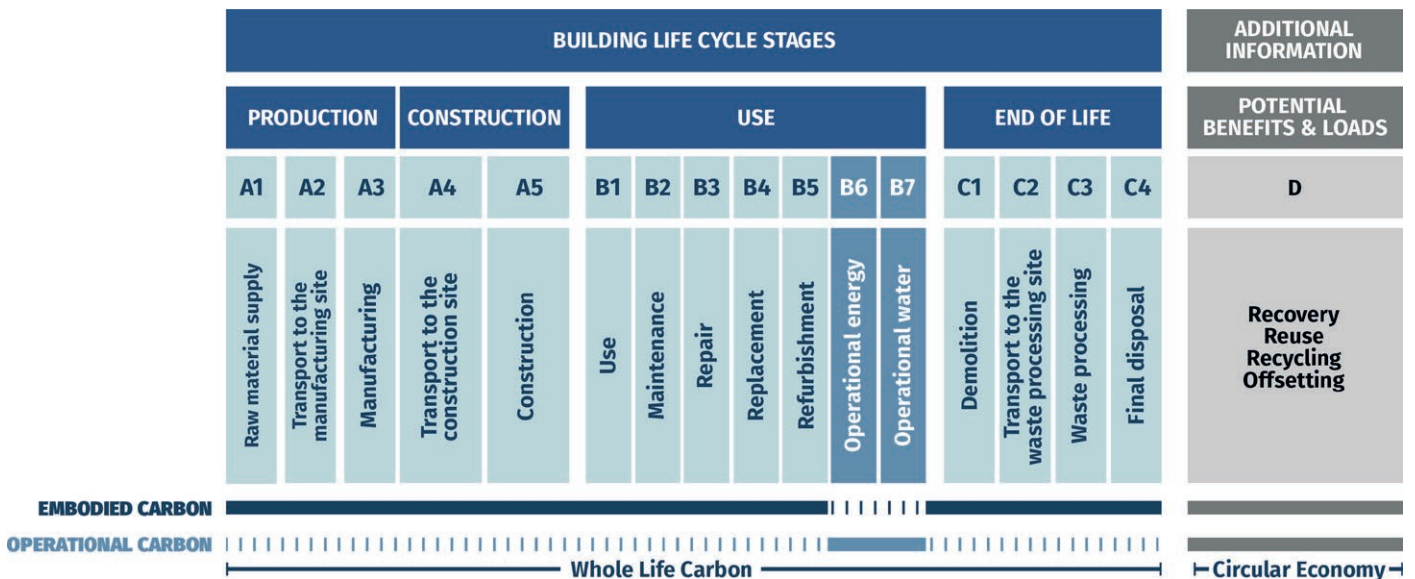
(generic data). Il metodo base consente pertanto di stimare le probabili emissioni di CO<sub>2</sub>eq.

Il secondo metodo, invece, permette di contabilizzare l'EC in fasi evolute del progetto o di esecuzione del manufatto, attraverso informazioni dettagliate presenti su schede tecniche o certificazioni ambientali (es. *Environmental Product Declara-*

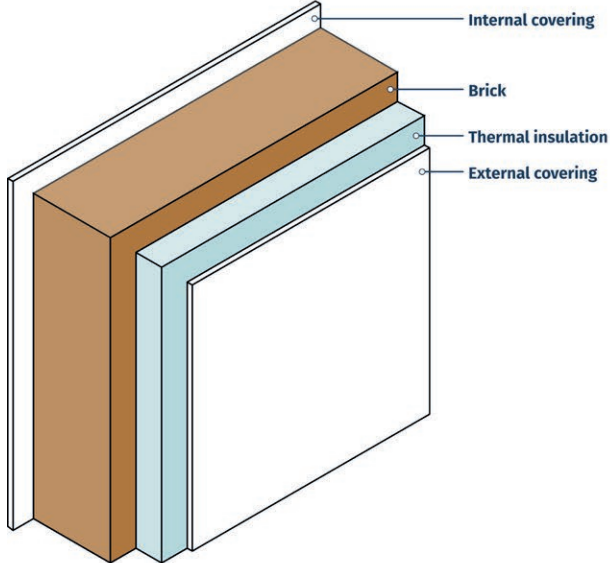
## 02 | DEC50's regulatory and technical framework



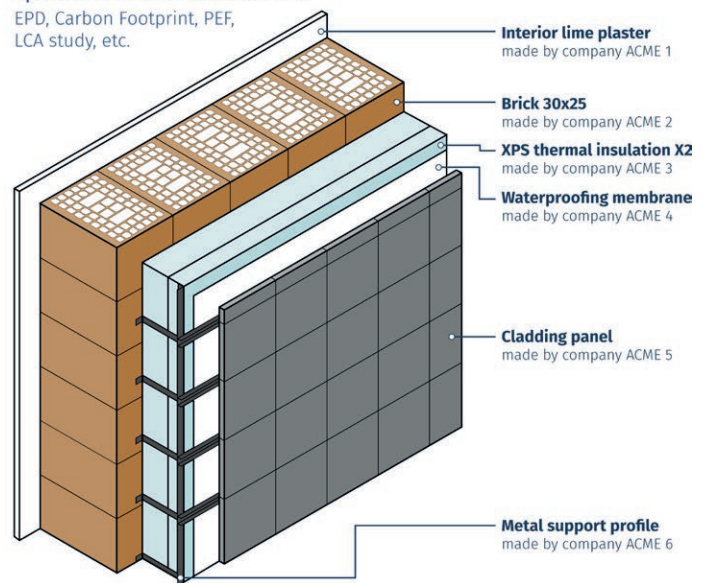
03 |



**Early design**  
**BASIC METHOD**  
 generic data and information



**Detailed design**  
**ADVANCED METHOD**  
 specific data and information



tion, Carbon Footprint, ecc.).

Entrambi i metodi sono applicabili a un numero elevato di tipologie edilizie che comprendono manufatti residenziali, destinati al terziario e ai servizi, opere temporanee, infrastrutture, ecc., la cui valutazione avviene attraverso la scomposizione in elementi tecnici e di impianto.

DEC50 ha inoltre indagato alcuni aspetti specifici connessi alla valutazione dell'EC dei manufatti edilizi, al fine di armonizzare la metodologia agli standard internazionali.

La ricerca ha, ad esempio, approfondito il tema della durata del ciclo di vita di un manufatto, proponendo uno scenario temporale di riferimento, che varia in relazione alla tipologia di ma-

Environmental Product Declaration, Carbon Footprint, etc.) or the building is under execution.

Both methods apply to a large number of building types that include residential buildings, buildings intended for tertiary, temporary works, infrastructures, etc., overall evaluated through the classification into technical systems and services.

At the same time, the research investigated some aspects related to building and EC accounting metrics to harmonise the methodology with the standards and technical documents taken as references.

The first aspect concerns the reference study period of the WLC assessment. Significantly, the reference study period does not necessarily match a building's actual or potential lifecycle, which can be either shorter or longer. The methodology states the period (years).

The number depends on the intended use and refers to some scientific references (Dodd *et al.*, 2017; BSI, 2016).

A further aspect of the investigation refers to the EC values normalisation process. The OC is usually determined as a value normalised over the square metre of gross heated area. It is stated in CO<sub>2</sub>eq emissions per year (tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>year); consequently, the EC is also calculated with the same unit for an overall assessment. Furthermore, DEC50 proposes some normalisation options, depending on the type of building analysed. Several databases and spreadsheets have been collected and classified according to EC accounting methods – basic or advanced – referring to generic or specific values.

Finally, DEC50 highlights some potential difficulties in the EC accounting process. While the production (A1/

nufatto (Dodd *et al.*, 2017; BSI, 2016).

Un altro aspetto ha riguardato il processo di normalizzazione dei valori di EC. L'OC è di norma determinata rispetto al metro quadrato di superficie climatizzata ed espressa in emissioni di CO<sub>2</sub>eq all'anno (tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno); di conseguenza, per poter effettuare una valutazione WLC è necessario che anche l'unità con cui si valuta l'EC sia la stessa. Sono state pertanto stabilite alcune opzioni di normalizzazione, variabili a seconda della tipologia di manufatto considerato.

Sono stati inoltre studiati e classificati database e fogli di calcolo, da cui reperire valori generici o specifici per le valutazioni dell'EC.

A3) is a straightforward calculation stage due to a large number of databases, including open sources, and the OC can be calculated through energy simulation tools, the remaining stages: construction (A4/A5) use (B1/B5) and end-of-life (C1/C4) are frequently characterised by a higher level of uncertainty due to the unavailability of information.

**Calculation procedures**

The second part of DEC50 has defined, for the basic and advanced method, from stage A1 to stage C4, the procedures to account for EC and evaluate WLC.

The calculation procedure includes specific issues such as the services EC evaluation, the biogenic calculations – Carbon Sequestration (CS) – and the CO<sub>2</sub> absorption (uptake) in cement-based products – also known as Car-

bon Uptake (CU).

This has encompassed the technical-scientific references to deepen the mentioned aspects: Technical Specifications (TS) and Technical Memorandum (TM).

The EC calculation of the different stages of the building's lifecycle and the WLC assessment is explained below, highlighting some specific aspects concerning materials and services.

**Production (A1/A3)**

The production stage (A) concerns three modules, i.e., raw resources supply (A1), transport to the production site (A2), and manufacture of the semi-finished or finished product (A3).

DEC50 reports calculating the production stage (EC<sub>A1-A3</sub>) as the sum of the EC of the three modules, whose impact is mainly influenced by the type of energy resource (fossil vs. renewable)

Infine, DEC50 ha definito dei requisiti minimi di prestazione dell'EC e dell'OC, che comprendono: la fase di produzione (A1/A3), che può essere valutata utilizzando database, anche *open source*, e la fase operativa (B6) desumibile da strumenti di simulazione energetica. Le restanti fasi di costruzione (A4/A5), uso (B1/B5) e fine vita (C1/C4) poiché connotate da un livello di incertezza maggiore, sono da contabilizzare in relazione alla disponibilità di informazioni.

**Procedure di calcolo** La seconda parte della ricerca ha definito, in conformità al metodo base e avanzato, le procedure di contabilizzazione dell'EC e di valutazione della WLC: dalla fase A alla fase C. Sono stati inclusi calcoli specifici come, la valutazione dell'EC degli impianti, la determinazione della componente biogenica – *Carbon Sequestration (CS)* – e lo studio dell'assorbimento di CO<sub>2</sub> nei prodotti a base cemento – *Carbon Uptake (CU)*. Ne è conseguito un approfondimento di riferimenti tecnico scientifici, in particolare di *Technical Specifications (TS)* e *Technical Memorandum (TM)*. Sono di seguito illustrati alcuni aspetti caratterizzanti utili al calcolo dell'EC.

**Produzione (A1/A3)**  
L'EC della fase di produzione si ottiene aggregando le sottofasi A1/A3, ovvero, estrazione delle risorse, trasporto al sito produttivo e realizzazione del semilavorato o prodotto finito. L'impatto della fase di produzione (EC<sub>A1-A3</sub>) è dunque da intendere come il risultato della somma delle tre sottofasi, influenzato dalla tipologia di risorsa energetica (fossile vs rinnovabile) e

and the raw material (e.g., CO<sub>2</sub> emission by cement calcination process). DEC50 also proposes more options for determining EC<sub>A1-A3</sub>. It recommends using the so-called Bill-of-Quantities (BoQ). This approach means studying the actual amounts of materials and products delivered to the construction site, including waste produced by construction works and surpluses (materials acquired but not used in building construction). The EC<sub>A1-A3</sub> is thus determined by multiplying the BoQ data by the corresponding specific emission factors.

**Construction (A4/A5)**  
Module EC<sub>A4</sub> accounts for the materials and products transported to the construction site. The calculation procedure needs information on the types of vehicles and the distances travelled. Module EC<sub>A5</sub> – instead – analyses the

emissions of all those operations carried out on-site with the support of specific types of equipment. The calculation procedure uses SCAB (South Coast Air Basin fleet average emission factors) (AQMD, 2023). Such a reference is effective for different off-road diesel-powered vehicles. Instead, a specific emission coefficient is required for cars powered by Electric Energy, depending on the national energy mix adopted (ISPRA, 2022).

**Use (B1/B5)**  
The usage stage (B) includes five modules, between B1 and B5, associated with the EC indicator; the remaining modules – B6 and B7 – are, instead, calculated as OC. Module EC<sub>B1</sub> analyses the CO<sub>2</sub>eq impact due to the use of materials and services regarding the reference study period. OC impact is not included in this mod-

della materia prima (ad esempio il processo di calcinazione del cemento che rilascia elevate quantità di CO<sub>2</sub>). DEC50 propone più opzioni per la contabilizzazione dell'EC<sub>A1-A3</sub>, tra cui una riferita alla *Bill-of-Quantities (BoQ)*, ovvero, i materiali e prodotti effettivamente conferiti al cantiere, da cui si genereranno rifiuti delle attività di costruzione ed eccedenze (intese come risorse acquisite ma non impiegate nella realizzazione del manufatto). L'EC<sub>A1-A3</sub> si determina moltiplicando i dati della BoQ per i fattori di emissione specifica corrispondenti.

**Costruzione (A4/A5)**  
La sottofase EC<sub>A4</sub> studia le operazioni di trasporto di materiali e prodotti al cantiere. La procedura di calcolo necessita pertanto di informazioni relative alle tipologie di mezzi e alle distanze percorse. La sottofase EC<sub>A5</sub> verifica, invece, le emissioni di tutte quelle operazioni svolte in cantiere, tramite l'ausilio di mezzi dedicati. Il procedimento di calcolo si avvale di fattori di emissione specifica (AQMD, 2023), applicabili a differenti tipologie di mezzi (*off-roads*) alimentati a gasolio. Mentre, per i mezzi alimentati a Energia Elettrica (EE) si raccomanda l'utilizzo del coefficiente di emissione specifica, in funzione del mix energetico nazionale (ISPRA, 2022).

**Uso (B1/B5)**  
La fase d'uso (B) contempla cinque sottofasi, comprese tra B1 e B5, associate all'indicatore EC; le sottofasi (B6 e B7) sono, invece, oggetto di verifica come OC. L'EC<sub>B1</sub> analizza l'impatto in termini di CO<sub>2</sub>eq dovuto all'uso degli elementi tecnici e di impianto, in relazione allo scenario

ing CO<sub>2</sub>eq emissions. This operation marks a significant change in the building's shape and volume. Therefore, it must be assumed as essentially different from the replacement module (B4). The calculation of EC<sub>B5</sub> thus represents a sum of other modules ranging from production and construction (A) to demolishing parts of the previously existing building.

**End of Life (C1/C4)**  
The end-of-life stage (C) represents one of the most unpredictable accounting processes. It involves assessing the EC of modules C1, C2, C3, and C4 in a time scenario far from the design stage. Particularly, DEC50 has highlighted two critical aspects of accounting. The first question concerns module C1, which corresponds to the emission assessment of demolition operations.

It follows that CO<sub>2</sub>eq accounting refers to greenhouse gas releases matched to refrigerant gases used for the services or caused by paints and foams; CO<sub>2</sub> uptake in cement-based products (CU) or by some types of finishes and attributed to the chemical phenomenon of carbonation; CO<sub>2</sub> compensation (CO<sub>S</sub>) due to vegetation (e.g. living wall system) or other capture technologies. The DEC50 research states that the maintenance (B2) and repair (B3) modules – materials and services preservation, conservation, and restoration – can be accounted for according to building features and calculated as a single contribution. Module EC<sub>B4</sub> analyses the operations of replacement and reinstallation of the building's complete technical or service elements. Module EC<sub>B5</sub> is matched to building renovation and to the correspond-

ing CO<sub>2</sub>eq emissions. This operation marks a significant change in the building's shape and volume. Therefore, it must be assumed as essentially different from the replacement module (B4). The calculation of EC<sub>B5</sub> thus represents a sum of other modules ranging from production and construction (A) to demolishing parts of the previously existing building.

**End of Life (C1/C4)**  
The end-of-life stage (C) represents one of the most unpredictable accounting processes. It involves assessing the EC of modules C1, C2, C3, and C4 in a time scenario far from the design stage. Particularly, DEC50 has highlighted two critical aspects of accounting. The first question concerns module C1, which corresponds to the emission assessment of demolition operations.

temporale di riferimento. In particolare, il processo di contabilizzazione si riferisce a: 1) emissioni di CO<sub>2</sub> imputabili all'impiego di vernici, di gas refrigeranti negli elementi di impianto, ecc.; 2) assorbimenti di CO<sub>2</sub> (carbonatazione) da parte di alcune tipologie di finiture e prodotti a base cemento (CU); 3) compensazioni di CO<sub>2</sub> (CO<sub>S</sub>) dovute a tecnologie vegetali (es. *Nature Based Solutions*).

Nella ricerca DEC50 si è stabilito che le sottofasi di manutenzione (B2) e riparazione (B3) – riconducibili ad attività di protezione, conservazione e ripristino degli elementi tecnici e di impianto – siano valutate come un singolo contributo: EC<sub>B2-B3</sub>. L'EC<sub>B4</sub> contabilizza, invece, le operazioni di sostituzione e reinstallazione di interi elementi tecnici o di impianto dell'edificio. Infine, lo studio dell'EC<sub>B5</sub>, stima le emissioni dovute ai processi di ristrutturazione. Tale operazione è da intendersi come una variazione significativa delle caratteristiche morfologiche e volumetriche del manufatto edilizio e, pertanto, non equiparabile alla fase di sostituzione (B4). Il calcolo dell'EC<sub>B5</sub> rappresenta quindi una sommatoria di fasi: dalla produzione e costruzione (A) alla demolizione di porzioni di manufatto preesistenti (C).

#### Fine Vita (C1/C4)

Il fine vita (C) rappresenta una fase particolarmente complessa della procedura di calcolo. Si tratta di stimare uno scenario potenziale di demolizione del manufatto, una volta esaurita la fase operativa. Il fine vita di un manufatto è infatti da contabilizzare al termine dello scenario temporale di riferimento (vale a dire dopo 50, 60 anni) e può incidere significativamente sul calcolo dell'EC.

These operations may happen in different periods of the building's life-cycle, such as pre-construction (A5), ordinary and extraordinary maintenance (B2/B5), and deconstruction (C1). Therefore, DEC50 has defined the EC<sub>C1</sub> as a sum of several EC contributions by one or more previously mentioned modules.

The second aspect deals with modules C3 and C4. They define and assess construction and demolition waste treatment and disposal. These modules may significantly affect EC accounting at the end of the reference study period (e.g., after 50 or 60 years). DEC50 has thus stated two assessment scenarios: 1) landfilling 100% of the waste; 2) delivering 30% of the waste to landfill and 70% to recycling processes. The latter scenario meets the European Commission's 2030 circularity targets (COM, 2020). Both scenarios use

specific emission factors set up by the Business, Energy & Industrial Strategy Department (BEIS, 2022) to account for the EC<sub>C3-C4</sub>.

Even with the uncertainties associated with assessing an impact that will occur in the future, module C2 is less complex to evaluate than those described above because EC<sub>C2</sub> accounts for emissions of transport activities to waste treatment or disposal sites. DEC50 establishes the use of the accounting procedure described in EC<sub>A4</sub>.

#### WLC (A/C)

The WLC building assessment is the result of the EC and OC contributions, obtained according to the following formula:

$$WLC = \sum_{j=1}^n \frac{[EC_{A1-A3j} + (-CS_{A1-A3j}) + EC_{A4j} + EC_{A5j}] + [EC_{B1j} + (-CO_{S_{B1j}}) + (-CU_{B1j}) + EC_{B2-B3j} + EC_{B4j} + EC_{B5j}] + (OC_{B6j} + OC_{B7j}) + [EC_{C1j} + EC_{C2j} + EC_{C3-C4j} + (CS_{C3-C4j}) + (-CU_{C3-C4j})]}{kgCO_2eq}$$

La contabilizzazione della maggior parte delle sottofasi si ottiene con fattori di emissione specifica, ricavati da alcune fonti (BEIS, 2022).

Nella sottofase C1, si richiede di contabilizzare le emissioni dei processi di demolizione. Tali attività, in realtà, possono interessare diverse fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio, riconducibili a interventi preliminari la costruzione (A5), e la manutenzione ordinaria e straordinaria (B2/B5). Il risultato finale (EC<sub>C1</sub>) è pertanto da intendere come una sommatoria di più contributi di EC in cui la sottofase C1 si ripete.

La sottofase C2 contabilizza le emissioni dovute al trasporto dei rifiuti al sito di trattamento o smaltimento finale. La metodologia è identica a quella descritta per la sottofase EC<sub>A4</sub>.

Per le sottofasi C3 e C4, si prevede di definire le modalità di trattamento e smaltimento dei rifiuti, che derivano dalle attività di demolizione. DEC50 ha definito due scenari, così organizzati: 1) conferimento del 100% dei rifiuti in discarica; 2) conferimento del 30% dei rifiuti in discarica e la restante porzione (70%) a processi di riciclo. Lo scenario 2 è conforme agli obiettivi di recupero previsti dalla Commissione Europea per il 2030 (COM, 2020).

#### WLC (A/C)

La valutazione WLC di un manufatto edilizio è il risultato dei contributi EC ed OC, così ottenuto:

$$WLC = \sum_{j=1}^n \frac{[EC_{A1-A3j} + (-CS_{A1-A3j}) + EC_{A4j} + EC_{A5j}] + [EC_{B1j} + (-CO_{S_{B1j}}) + (-CU_{B1j}) + EC_{B2-B3j} + EC_{B4j} + EC_{B5j}] + (OC_{B6j} + OC_{B7j}) + [EC_{C1j} + EC_{C2j} + EC_{C3-C4j} + (CS_{C3-C4j}) + (-CU_{C3-C4j})]}{kgCO_2eq}$$

Where:

EC (from A1 to C4) = contribution of all materials and products, plants, transport equipment, and equipment used in the building's life cycle

OC (from B6 to B7) = emissions due to the building's operations

CS (A) = CO<sub>2</sub> storage/absorption of wood-based products used in the building

CO<sub>S</sub> (B1) = CO<sub>2</sub> absorption of green solutions

CS (from C3 to C4) = CO<sub>2</sub> storage/emission of wood-based waste from demolition activities

CU (B) = CO<sub>2</sub> absorption of cement-based products used in the building

CU (from C3 to C4) = CO<sub>2</sub> absorption of cement-based waste from demolition activities

Table 1 summarises the accounting methodology for the building's life cycle

stages and modules. It also indicates when the values of EC are ascribed to CO<sub>2</sub>eq emissions only, and when they are referred to as CO<sub>2</sub> released, stored and absorbed (i.e., wood-based and cement-based products) and offset.

#### Conclusions

The methodological aspects and the calculation procedures proposed by DEC50 are still characterised by some uncertainties ascribed to the availability of information and calculation tools. Nevertheless, according to appropriate metrics, the outcomes return a robust and consistent methodology for the building's Carbon Footprint assessment. DEC50 states the data sources and the calculation procedures, stage by stage and module by module.

DEC50 contributes to the comparison of programmes and scientific outcomes on the topic of WLC in other



Dove:  
 EC (da A1 a C4) = contributo di tutti i materiali e prodotti, elementi di impianto, mezzi di trasporto e attrezzature utilizzati nel ciclo di vita del manufatto edilizio  
 OC (da B6 a B7) = emissioni dovute al funzionamento del manufatto edilizio  
 CS (A) = stoccaggio/assorbimento di CO<sub>2</sub> in prodotti a base legno utilizzati nel manufatto edilizio  
 CO\_S (B) = assorbimento di CO<sub>2</sub> delle soluzioni vegetate

CS (da C3 a C4) = stoccaggio/emissione di CO<sub>2</sub> in rifiuti a base legno prodotti da attività di demolizione  
 CU (B) = assorbimento di CO<sub>2</sub> in prodotti a base cemento utilizzati nel manufatto edilizio  
 CU (da C3 a C4) = assorbimento di CO<sub>2</sub> dei rifiuti a base cemento prodotti da attività di demolizione.

La tabella 1 riassume le metodologie di contabilizzazione delle diverse fasi del ciclo di vita di un manufatto, indicando quando i valori di EC sono riconducibili alle sole emissioni di CO<sub>2</sub>e quando sono riferite sia a rilasci sia a stoccaggi/compensazioni

Tab. 01 |

Stages	Modules	Type of EC	Accounting methodology
Production and Construction (A)	Raw material supply (A1)	Released	Unit values of EC are multiplied by the total amount of material required by building's project. The unit value of EC is available as generic data from databases or as specific data such as EPD, Carbon Footprint, etc.
	Trasport to production site (A2)	Stored	
	Manufacturing (A3)		
	Transport to construction site (A4)	Released	
	Construction (A5)	Released	Diesel consumed by equipment is multiplied by its specific emission factors (AQMD, 2023), while electricity consumed is multiplied by other emission factors (ISPRA, 2022).
Use (B)	Use (B1)	Released	Total amount of refrigerant gas and other greenhouse gas emission released by building services or other technical elements are multiplied by EC value. CO <sub>2</sub> removals and offsets are evaluated for wood-based and cement-based products such as capture materials (e.g., paints).
		Removed	
		Offsetted	
	Maintenance (B2) Repair (B3)	Released	
	Replacement (B4)	Released	
Stored			
Removed			
Refurbishment (B5)	Released	Same procedure as <i>Production</i> (A1/A5), <i>Use</i> (B1/B4), and <i>End-of-Life</i> (C1/C4).	
	Stored		
	Removed		
End-of-Life (C)	Deconstruction (C1)	Released	Same procedure as <i>Construction</i> (A5).
	Transport to waste processing site (C2)	Released	Same procedure as <i>Transport to construction site</i> (A4).
	Waste processing (C3)	Released	Scenario 1 (100% landfill) and scenario 2 (70% recycling and 30% landfill) are set up to evaluate the EC.
	Final disposal (C4)	Stored	
		Removed	Total amount of building and construction waste (produced in stage A5, B2/B5, and C1) is multiplied by its specific emission factors (BEIS, 2022).



di CO<sub>2</sub> associati alle componenti biogeniche (*stored and offsetted*) o a processi di assorbimento (*removed*).

## Conclusioni

Pur consapevoli che gli aspetti metodologici e le procedure di calcolo proposte dalla ricerca DEC50 sono contraddistinte da alcuni limiti, imputabili alla disponibilità di informazioni e degli strumenti di verifica, vi è però da evidenziare che il risultato conseguito restituisce a livello nazionale una metodologia organica di determinazione dell'*Embodied Carbon* di un manufatto.

DEC50 contribuisce al confronto tra programmi condotti sul tema WLC in altri paesi europei e può costituire uno dei riferimenti per l'attuazione dei requisiti della Direttiva EPBD.

La scomposizione di DEC50 secondo due metodi consente un'applicabilità pressoché completa nella versione avanzata, poiché l'origine dei dati è costituita da EPD o da eventuali altre certificazioni ambientali disponibili. Nel caso, invece, del metodo base, associato a condizioni preliminari di progettazione, apparentemente più semplici, il reperimento dei dati per la contabilizzazione dell'EC e la valutazione WLC è da ritenere più complessa. L'assenza di una banca dati nazionale, a differenza di altri Paesi limita le potenzialità di applicazione.

Vi è però da rilevare che sono in corso studi, i cui esiti possono condurre alla messa a punto di una banca dati nazionale, o all'adattamento di una banca dati straniera.

La ricerca DEC50 è stata presentata in ambito UNI (Commissione UNI/CT 058: Città, comunità e infrastrutture sostenibili), che ha deciso di condividerne alcuni aspetti metodologici.

Nel periodo compreso tra il 2023 e il 2025 GBC ha programma-

European countries, and can be one of the references for implementation of EPBD Directive requirements. At the national level, DEC50 establishes one of the first approaches for the building's EC. Sources are available for processing and calculation procedures for almost all the building's lifecycle stages. The DEC50 two-method approach allows almost complete applicability in the advanced model, since EPDs or other available environmental certifications are the data source. On the other hand, although it is associated with apparently more straightforward design preconditions, the data retrieval for EC accounting and WLC assessment in the basic method is more complicated. Unlike in other Countries (e.g., INIES in France; Inventory of Carbon and Energy (ICE) in Great Britain; Ökobaudat in Germany), the lack of a national database limits the

potential for application and dissemination of the methodology.

However, it should be noted that studies by some stakeholders are ongoing, whose outcomes may lead to developing a national database or to adapting a foreign database.

The DEC50 research has been presented within UNI (UNI/CT 058 Commission: Sustainable cities, communities, and infrastructures), which decided to share some methodological aspects.

In the period between 2023 and 2025 GBC planned to apply the methodology to case studies. It is intended to understand any weaknesses in the calculation procedures and, consequently, the necessary feedback and corrective actions.

In addition, it is planned to define the benchmark values of EC and WLC, fit for the future buildings' environmental

to di applicare la metodologia a una serie di casi di studio per comprendere gli eventuali limiti delle procedure di calcolo e, di conseguenza, definire le necessarie azioni correttive.

Si prevede, inoltre, di definire dei valori *benchmark* di EC e di WLC, utili a future classificazioni energetico ambientali dei manufatti edilizi, suddivisi in relazione alla destinazione d'uso e in relazione e alla tipologia di intervento (ad esempio, edifici nuovi e in ristrutturazione).

Infine, vi è l'intenzione di estendere l'attività di ricerca, studiando la fase "Oltre il ciclo di vita (D)", che consentirà di stabilire e sviluppare le connessioni tra transizione energetica, decarbonizzazione ed economia circolare, includendo le strategie di riuso e di riciclo, le soluzioni di compensazione attraverso il ricorso a fonti rinnovabili, le tecnologie di confinamento geologico dell'anidride carbonica (*Carbon Capture and Storage*) e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> mediante vegetazione.

## ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

La ricerca è stata finanziata da GBC Italia, nell'ambito del Progetto Europeo #BuildingLife.

Gli autori desiderano ringraziare il personale GBC Italia per il supporto fornito nello svolgimento del progetto e i membri del Gruppo di Lavoro per la collaborazione allo sviluppo della metodologia di valutazione WLC.

L'articolo è scritto in parti uguali dagli autori.

## REFERENCES

Andreotti, J. and Giordano, R. (2023), "Strumenti per la decarbonizzazione: contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio", available at: [www.gbccitalia.org/area-download/roadmap/](http://www.gbccitalia.org/area-download/roadmap/) (accessed 27 April 2023).

energy ratings, according to uses and construction typology (for instance, new installations or services under renovation).

Finally, a potential outlook is to extend the research activity, studying the "Beyond the life cycle (D)" stage. The latter is a particularly challenging issue as it will allow to find and develop the connections between energy transition, decarbonisation, and circular economy. Namely, reuse and recycling strategies, compensation solutions through renewable sources, carbon dioxide geological confinement technologies (Carbon Capture and Storage) and CO<sub>2</sub> storage through vegetation.

## ATTRIBUTION, RECOGNITION, CREDITS, COPYRIGHT

GBC Italia funded the research as part of the European Project #BuildingLife. The authors would like to thank the

GBC Italia staff for their support in carrying out the project and all the working group members for the collaboration in developing the EC accounting and WLC assessment methodology.

The article is written in equal parts by the authors.

- British Standards Institution (2016), “Carbon Management in Infrastructure”, available at: [www.knowledge.bsigroup.com/products/carbon-management-in-infrastructure/standard](http://www.knowledge.bsigroup.com/products/carbon-management-in-infrastructure/standard) (accessed 22 February 2023).
- Commissione Europea (2020), “COM(2020) 98 final: Un nuovo piano d’azione per l’economia circolare Per un’Europa più pulita e più competitiva”, available at: [www.eur-lex.europa.eu](http://www.eur-lex.europa.eu) (accessed 24 February 2023).
- Commissione Europea (COM) (2021), “COM(2021) 802 final: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (recast) – EPBD”, available at: [www.eur-lex.europa.eu](http://www.eur-lex.europa.eu) (accessed 23 February 2023).
- Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) (2022), “Greenhouse gas reporting: conversion factors 2022”, available at: [www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022](http://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022) (accessed 25 February 2023).
- Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M. and Donatello, S. (2017), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Ente Italiano di Normazione (UNI) (2011), *Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo* (UNI EN 15978:2011).
- Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) (2020), “GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings, and construction sector”, available at: [www.globalabc.org/roadmaps-buildings-and-construction](http://www.globalabc.org/roadmaps-buildings-and-construction) (accessed 22 February 2023).
- Green Building Council Italia (GBC Italia) (2022), “Decarbonizzare il ciclo di vita dell’ambiente costruito. Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050”, available at: [www.gbccitalia.org/wp-content/uploads/2022/12/gbccitalia\\_roadmap\\_2050.pdf](http://www.gbccitalia.org/wp-content/uploads/2022/12/gbccitalia_roadmap_2050.pdf) (accessed 22 February 2023).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I*, Cambridge University Press.
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2021), “Rapporto 363/2022: Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico”, available at: [www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/r363-2022.pdf](http://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/r363-2022.pdf) (accessed 23 February 2023).
- Pomponi, F. and Moncaster, A. (2019), “Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, n. 2, pp. 2431-2442.
- South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD) (2023), “Off-road Mobile Source Emission Factor (Scenario Years 2007 – 2025)”, available at: [www.aqmd.gov/home/rules-compliance/ceqa/air-quality-analysis-handbook/off-road-mobile-source-emission-factors](http://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/ceqa/air-quality-analysis-handbook/off-road-mobile-source-emission-factors) (accessed 23 February 2023).
- Unione Europea (2021), “Regolamento (UE) 2021/1119: Normativa europea sul clima”, available at: <https://eur-lex.europa.eu> (accessed 22 February 2023).
- World Green Building Council (WBG) (2022), “Advancing Net Zero Status Report”, available at: [www.worldgbc.org/advancing-net-zero/](http://www.worldgbc.org/advancing-net-zero/) (accessed 28 February 2023).