



**Green
Building
Council
Italia**

Strumenti per la decarbonizzazione:

contabilizzazione
dell'Embodied Carbon
nel ciclo di vita
di un manufatto edilizio

#BUILDINGLIFE

Allegato alla Roadmap Italiana

Gruppo di Lavoro e Autori

Il presente report raccoglie e riassume il lavoro e gli esiti del tavolo “Strumenti per la Decarbonizzazione” con l’obiettivo principale di definire la metodologia e gli strumenti di calcolo per valutare le emissioni di carbonio equivalente nell’intero ciclo di vita di un manufatto edilizio. Nell’ambito delle attività condotte si è deciso di adottare la definizione manufatto edilizio, qui inteso come esito finale di un processo realizzativo destinato a soddisfare un quadro articolato e complesso di esigenze.

Il tavolo “Strumenti per la Decarbonizzazione” è coordinato dal gruppo di ricerca Tecnologia e Ambiente del Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino e si avvale di un Gruppo di Lavoro con il quale si è condivisa l’organizzazione delle attività, il materiale di riferimento, la metodologia di lavoro e gli strumenti per il progetto.

Autori

L’iter è stato coordinato da **Roberto Giordano** e **Jacopo Andreotti** che hanno elaborato il report. Il Green Building Council Italia e gli autori desiderano ringraziare i seguenti collaboratori, per il supporto fornito nello svolgimento delle attività:

Antonio Princigallo, *Italcementi*

Carmela Mansi, *ICMQ*

Carola Arrivas Bajardi, *Architetto*

Mikaela Decio, *MAPEI*

Elena Leonardelli, *Macro Design Studio*

Elena Montacchini, *Politecnico di Torino*

Giorgia Lorenzi, *Macro Design Studio*

Giuseppe Zaffino, *Greenwich*

Iris Visentin, *PT QualityNet*

Laura Pighi, *Distretto Tecnologico del Trentino*

Michele Milan, *Ecarnicert*

Marco Merla, *DEERNS Italia*

Marina Stavrakantonaki, *Jacobs*

Massimiliano Mandarini, *Architetto*

Maurizio Cellura, *Università di Palermo*

Maurizio Ratti, *Ingegnere*

Mauro Farina, *Cushman&Wakefield*

Michele Viesti, *Harpaceas*

Monica Lavagna, *Politecnico di Milano*

Michela Tedeschi, *Manens-Tifs*

Olivera Batoz, *KONE*

Pasqualino Allegro, *Ingegnere*

Rita Mattei, *DNV*

Sebastiano Greco, *ICMQ*

Silvia Tedesco, *Politecnico di Torino*

Simona Marinelli, *Architetto*

Ugo Piccinno, *Harpaceas*

Valerio De Canal, *DTTN*

Pubblicazione a cura di Green Building Council Italia

Valentina Marino – Responsabile progetti internazionali

Marco Caffi – Direttore GBC Italia

Silvia Giordano – Responsabile comunicazione progetti internazionali

Come citare il presente documento

Andreotti, J., Giordano, R. (2023). Strumenti per la decarbonizzazione: contabilizzazione dell’Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio (Caffi, M., Marino, V., Giordano, S., A cura di; allegato 5).

Disponibile al sito: <https://gbcitalia.org/area-download/roadmap/>

ISBN 978-88-6627-378-3

Indice

Gruppo di Lavoro e Autori	2
1. Introduzione	6
2. Obiettivi	11
3. Organizzazione del report	12
PARTE PRIMA EMBODIED CARBON: DEFINIZIONI E REQUISITI	13
4. Riferimenti normativi e tecnici	13
4.1 Definizioni e Glossario	14
4.1.1 Definizione di Embodied Carbon	14
4.1.2. Glossario	15
5. Requisiti per la contabilizzazione dell'Embodied Carbon	20
5.1 Fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio	20
5.2 Metodo di contabilizzazione BASE e metodo AVANZATO	23
5.3 Materiali, Elementi tecnici ed Elementi di impianto	24
5.4 Tipologie di manufatti	28
5.5 Confini temporali del processo di contabilizzazione	29
5.6 Unità di misura per la contabilizzazione	30
5.7 Database per la contabilizzazione	32
PARTE SECONDA EMBODIED CARBON: GUIDA ALLA VALUTAZIONE	35
6 PRODUZIONE (A1-A3)	37
6.1 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di produzione (A1- A3)	37
6.1.1 Produzione: Metodo BASE	37
6.1.2 Produzione: Metodo AVANZATO	42
BOX 1: Valutazione dell'Embodied Carbon di materiali e prodotti riciclati: ECA1-A3-rc	42

BOX 2: Carbon Sequestration dei prodotti in legno o a base legno – Produzione: CSA1-A3	44
7 COSTRUZIONE (A4 – A5)	46
7.1 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Trasporto al cantiere (A4)	46
7.1.1 Trasporti: Metodo BASE	46
7.1.2 Trasporti: Metodo AVANZATO	51
7.2 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Costruzione (A5)	51
7.2.1 Costruzione: Metodo BASE	52
7.2.2 Costruzione: Metodo AVANZATO	55
7.2.3 Valutazione dell’EC dei rifiuti da Costruzione: ECCW	56
8 USO (B1 – B2 – B3 – B4 – B5)	56
8.1 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase d’Uso (B1)	57
8.1.1 Uso: Metodo BASE	57
8.1.2 Uso: Metodo AVANZATO	59
BOX 3: Carbon Uptake dei prodotti a base cemento – Uso: CUB1	59
8.2 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Manutenzione (B2) e Riparazione (B3)	63
8.2.1 Manutenzione e Riparazione: Metodo BASE	64
8.2.2 Manutenzione e Riparazione: Metodo AVANZATO	65
8.3 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Sostituzione (B4)	67
BOX 4: Determinazione del fattore di sostituzione (replacement factor)	67
8.3.1 Sostituzione: Metodo BASE	70
8.3.2 Sostituzione: Metodo AVANZATO	71
8.4 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Ristrutturazione (B5)	71

9 FINE VITA (C1 – C2 – C3 – C4)	72
9.1 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Demolizione (C1)	72
9.2 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Trasporto dei rifiuti (C2)	74
9.3 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)	74
9.3.1 Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale: Metodo BASE	77
9.3.2 Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale: Metodo AVANZATO	78
BOX 5: Carbon Sequestration dei rifiuti a base legno – Fine vita: CSC3+C4	79
BOX 6: Carbon Uptake dei rifiuti a base cemento – Fine vita: CUC3+C4	80
10 OLTRE IL CICLO DI VITA (D)	84
10.1 Determinazione dell'Embodied Carbon oltre il ciclo di vita (D) del manufatto edilizio	84
11 WHOLE LIFE CARBON & VALUTAZIONE CIRCULAR ECONOMY	85
BOX 7: Carbon Off-Setting tramite attività di compensazione della CO ₂ con vegetazione. Fase d'Uso (B1) - CO_SB1 – Fase (D) - CO_SD	89
12 IMPIANTI E SERVIZI – MEP	90
12.1 Fasi del ciclo di vita	90
12.2 Determinazione dell'Embodied Carbon di Impianti e Servizi – MEP	90
12.2.1 Impianti e Servizi – MEP: Metodo BASE	91
12.2.1.1 Valutazione dell'EC con metodo BASE: procedura di calcolo	91
12.2.2 Valutazione dell'EC con metodo AVANZATO: procedura di calcolo	95
12.2.2.1 Valutazione dell'EC con metodo AVANZATO: procedura di calcolo	95
12.3 Perdite di refrigerante	100
BIBLIOGRAFIA	102

1. Introduzione

Il contesto di riferimento

Il World Green Building Council (WGBC) e la Global Alliance for Building and Construction (GlobalABC) costituiscono due dei principali riferimenti per lo sviluppo della metodologia di analisi e valutazione dell'*Embodied Carbon, della Whole Life Carbon e dei benefici e degli impatti connessi alla Circular Economy*.

In particolare, il WGBC nel report pubblicato a settembre 2019 [1] e la GlobalABC nel suo più recente documento pubblicato a maggio 2021 [2] ribadiscono alcuni concetti chiave:

- 1) Entro il 2030, il settore delle costruzioni dovrà essere in grado di ridurre in modo sensibile le emissioni operative (*Operational Carbon*), tanto da prevedere che il 100% dei nuovi edifici sia a zero emissioni di carbonio (*Zero Carbon*), o più precisamente a zero emissioni di anidride carbonica equivalente;
- 2) L'*Embodied Carbon* (EC), in tale contesto, non è più trascurabile, diventa altresì un indicatore attraverso il quale misurare l'efficienza energetica e l'impatto sui cambiamenti climatici di un'opera edilizia.

WGBC e GlobalABC stabiliscono anche che l'EC - sempre in riferimento al 2030 - dovrà essere ridotta di almeno il 40 % rispetto ai valori attuali. Comprendendo, inoltre, progetti di eccellenza - o *best practices* - che dovranno ridurre i valori di EC del 50%.

Sono inoltre disponibili ulteriori obiettivi da raggiungere entro il 2050. Limite entro il quale un manufatto nuovo o esistente dovrà garantire un bilancio zero di emissioni di anidride carbonica.

Vi sono, poi, azioni prioritarie per la decarbonizzazione di edifici e infrastrutture, stabilite dalla GlobalABC come ad esempio: "*Promote the use of low carbon materials*". Tale azione è direttamente correlata alla definizione e calcolo dell'EC, e prevede di: sviluppare banche dati che contengano informazioni appropriate, aumentare la consapevolezza sull'impatto ambientale dei processi edilizi e accelerare l'efficienza dei sistemi produttivi. La Figura 1.1 illustra una sintesi delle azioni rispetto all'area di interesse "*Materials*", così come previste dalla GlobalABC.

Altri documenti sottolineano l'importanza di un approccio di tipo circolare nel settore delle costruzioni. Tale approccio prefigura un modello di produzione e consumo votato all'estensione del ciclo di vita di materiali e prodotti, nonché alla riduzione e alla valorizzazione degli scarti, al fine di sviluppare un'economia sostenibile e attenta alle problematiche ambientali. Questo nuovo modello presuppone, pertanto, il ripensamento delle tradizionali pratiche di progettazione e costruzione dell'ambiente costruito.

È il caso, ad esempio della strategia *Renovation Wave* [3], della Commissione europea che dovrebbe costituire un riferimento nella redazione di specifiche tecniche e normative.



Figura 1.1 – Area di interesse e azioni strategiche previste dalla GlobalABC (elaborazione degli autori su fonte: GlobalABC [2]).

Ne consegue che l'importanza dell'EC nel breve medio periodo aumenterà, man mano che più edifici saranno costruiti e rinnovati adottando standard di efficienza energetica più elevati, con una corrispondente riduzione dell'Operational Carbon (OC) [4] [5].

È anche opportuno citare come alcuni autori abbiano evidenziato una chiara dicotomia tra OC ed EC [6]. L'OC può essere oggetto di riduzione e continuo miglioramento attraverso processi di costruzione e di riqualificazione che prevedono un ampio ricorso alle energie rinnovabili. L'EC, al contrario, si riferisce a fasi del ciclo di vita che non possono essere passibili di cambiamenti. Nel caso si faccia ricorso a materiali particolarmente energivori, le emissioni di CO₂ equivalente rilasciate in atmosfera associate alla loro produzione, costruzione o trasporto non ammettono possibilità di cambiamento o miglioramento nel tempo. A tal proposito, è quindi necessario porre una particolare attenzione all'EC come indicatore in grado di concorrere alla realizzazione di manufatti edilizi a impatto di carbonio zero entro il 2050.

La consapevolezza che l'attenzione sulle emissioni si stia progressivamente spostando dalla fase d'uso ad altre fasi del ciclo di vita di un'opera, solleva la necessità di integrare e implementare gli attuali sistemi di analisi e valutazione delle prestazioni energetico-ambientali, considerando i processi di estrazione delle materie prime e delle risorse energetiche, di trasformazione in semilavorati e prodotti finiti o in risorse energetiche derivate, di trasporto, posa in opera e costruzione, di sostituzione e manutenzione, di rimozione e demolizione, fino a contemplare scenari futuri di gestione dei rifiuti post demolizione, valutando anche la loro trasformazione in materie prime seconde, attraverso processi di riciclaggio e/o riuso (Figura 1.2).



Figura 1.2 – Emissioni di CO₂ associate al ciclo di vita di un manufatto edilizio (elaborazione degli autori su fonte: BPIE (Buildings Performance Institute Europe) (2021). Whole-life carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings. <https://www.bpie.eu/publication/whole-life-carbon-challenges-and-solutions-for-highly-efficient-and-climate-neutral-buildings/>

La contabilizzazione (termine mutuato dall'inglese "Accounting") delle emissioni di CO₂ equivalente nel ciclo di vita di un manufatto conduce a una valutazione definita Whole Life Carbon. **La Whole Life Carbon è da intendere come un bilancio di carbonio che considera sia le emissioni associate all'uso di un edificio (Operational Carbon),** determinate in funzione dei fabbisogni energetici per la climatizzazione, l'illuminazione e l'acqua calda sanitaria, **sia le emissioni di Embodied Carbon,** determinate considerando le fasi precedentemente descritte (Figura 1.3).

In tale contesto vale certamente la pena citare la proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia - COM/2021/802 final [7]. Il testo prevede una revisione dell'attuale Direttiva che regola l'efficienza negli usi energetici nel settore delle costruzioni (2010/31/UE), proprio attraverso l'integrazione del concetto di Whole Life Carbon (WLC); ovvero, contabilizzando le emissioni di anidride carbonica equivalente di ampio numero di fasi che caratterizzano il ciclo di vita di un manufatto edilizio. Ciò significa che, attraverso una progressiva integrazione di obiettivi, previsti per il 2030 e il 2050, si procede a un bilancio tra Operational Energy & Carbon ed Embodied Energy & Carbon. Si tratta quindi di un passaggio cruciale, poiché la proposta stabilisce che di un'opera si valuti l'impatto energetico e ambientale di

un complesso e articolato numero di processi.

Oltre alla Whole Life Carbon, vi sono infine i benefici o gli eventuali impatti ambientali, che possono essere contabilizzati "oltre il ciclo di vita" del manufatto edilizio (fase D). Tale processo di analisi e valutazione assume la denominazione di Circular Economy. Si tratta, in altre parole, di **quantificare il livello di circolarità, in termini di Embodied Carbon risparmiata, nel processo di produzione di nuovi e futuri materiali e prodotti, realizzati tramite reimpiego dei rifiuti.** Inoltre, la fase D si completa con la determinazione dell'eventuale quota di emissioni compensate attraverso un'attività di **Off-Setting**, qui intesa come un'iniziativa che contribuisce a ridurre le emissioni di gas serra prodotte dal processo edilizio in esame. La compensazione può avvenire attraverso investimenti in progetti di energie rinnovabili, protezione delle foreste e altro ancora.

Sempre in ambito Europeo, alcune nazioni stanno predisponendo una roadmap [8] non solo finalizzata a una Whole Life Carbon ma anche a fare in modo che entro il 2050 possa essere raggiunto il target di realizzare manufatti edilizi **Net Zero Whole Life Carbon.** La Gran Bretagna, la Danimarca e la Finlandia come illustrato nella Figura 1.4 sono paesi nei quali è in corso il processo di introduzione dell'EC come indicatore che concorre a una valutazione complessiva delle emissioni di anidride carbonica equivalente.

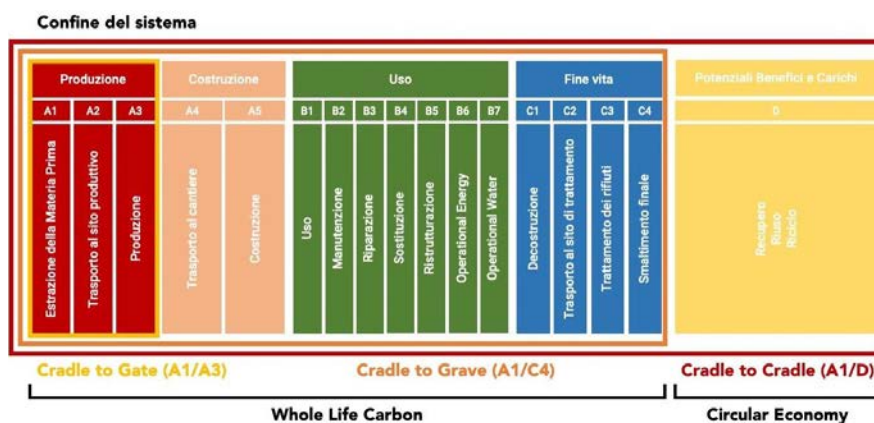


Figura 1.3 – Confini del sistema in relazione al ciclo di vita di un manufatto edilizio (fonte: elaborazione degli autori su indicazioni UNI EN 15978:2011).

STRUMENTI PER LA DECARBONIZZAZIONE: contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio



Figura 1.4 – Linea temporale delle azioni da prevedere per il raggiungimento di un Net Zero Whole Life Carbon entro il 2050 (elaborazione degli autori su fonte: Architects Climate Actions Network [8]).

In particolare, la Gran Bretagna si è dotata di un documento tecnico (professional statement) pubblicato da *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS) che introduce sia la verifica dell'EC sia le linee guida attraverso le quali procedere con la contabilizzazione della stessa EC [9].

Il documento elaborato da RICS opera una distinzione nel processo di valutazione, che viene condotto utilizzando fonti dati diverse in relazione alle fasi di progettazione. Si prevede, infatti, che venga condotta una Whole Life Carbon prima dell'inizio della progettazione esecutiva (ovvero la RIBA stage 4).

L'elemento di maggior interesse del documento predisposto da RICS è certamente da ricondurre alla sintesi proposta da normative della famiglia ISO 14000, in particolare ISO 14040, e le normative della famiglia 15000, cui si aggiungono alcuni documenti sviluppati da gruppi di lavoro internazionali (Figura 1.5), utili all'analisi dell'indicatore o alla caratterizzazione di alcuni aspetti specifici (trasporti, carbon uptake, ecc.).

L'elenco completo degli standard e dei documenti utilizzati è riportato in Tabella 1 e nella bibliografia del presente report.

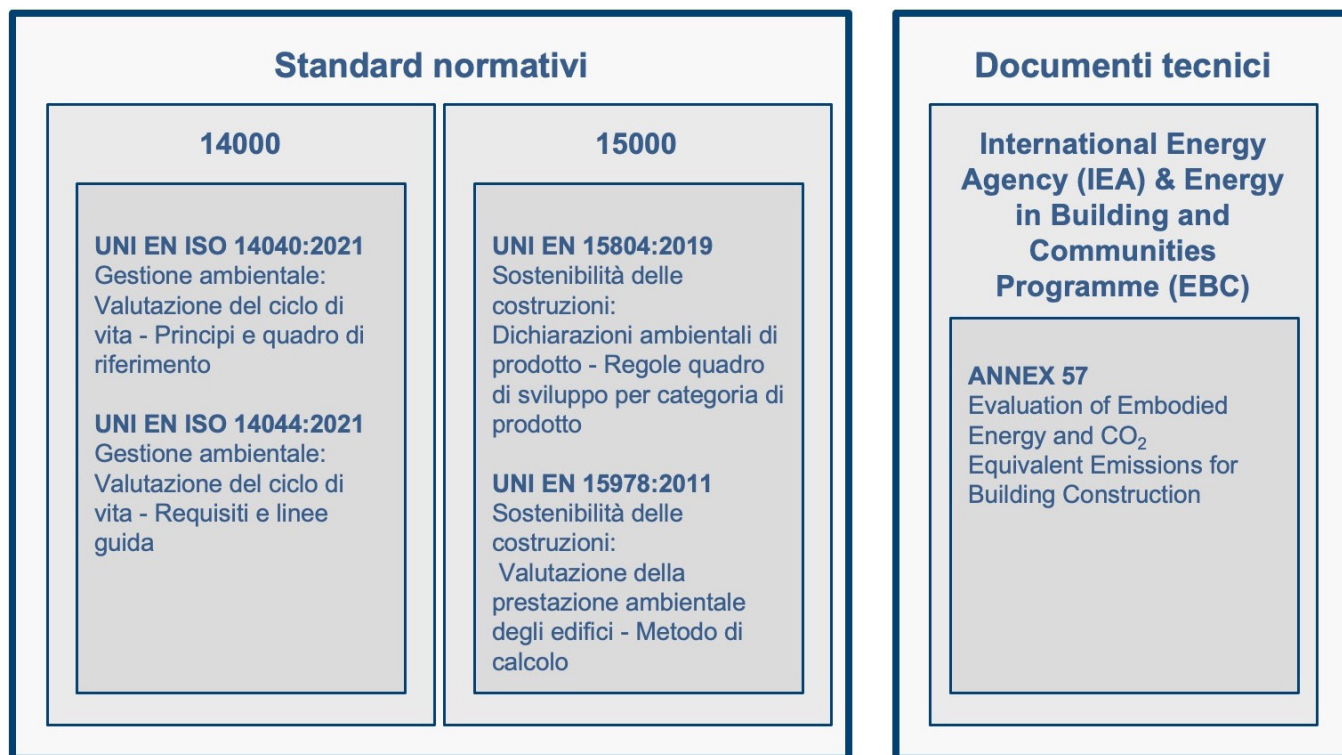


Figura 1.5 – Principali riferimenti normativi e tecnici utilizzati per lo sviluppo del report (elaborazione degli autori).

Si tratta nel complesso di un quadro metodologico che consente di approcciare alla valutazione attraverso: la definizione di un'unità funzionale; l'identificazione di confini del sistema di analisi e valutazione; la selezione di confini temporali e spaziali (con particolare riferimento alle fasi di trasporto); l'individuazione di elementi tecnici su cui condurre la valutazione dell'EC.

Sempre in Gran Bretagna, tra le iniziative a livello locale è opportuno ricordare LETI (*London Energy Transformation Initiative*), un network di oltre 1000 professionisti operanti nel settore delle costruzioni che a partire dal 2017 condividono l'obiettivo comune di "mettere Londra sulla strada verso un futuro a zero carbonio".

Il sito web LETI mette a disposizione numerosi documenti, tra cui alcune guide che si propongono di fornire metodi e strumenti per affrontare l'emergenza climatica [10]. In particolare, LETI – *Embodied Carbon Primer* [11] oltre a condividere il concetto di Whole Life Carbon stabilisce alcuni target riferiti a differenti scenari temporali. Con riferimento al periodo 2020-2030, il valore soglia di EC – che non dovrebbe essere superato sia per gli edifici nuovi sia per interventi di retrofit (ristrutturazione) destinati al residenziale – è fissato a $500 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ (comprendendo gli elementi strutturali, le tecnologie di involucro, gli impianti – *Mechanical, Electrical and Plumbing* – e le finiture). È inoltre previsto un ulteriore limite di $400 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ nel caso il progetto preveda un intervento di *off-setting* (Figura 1.6).

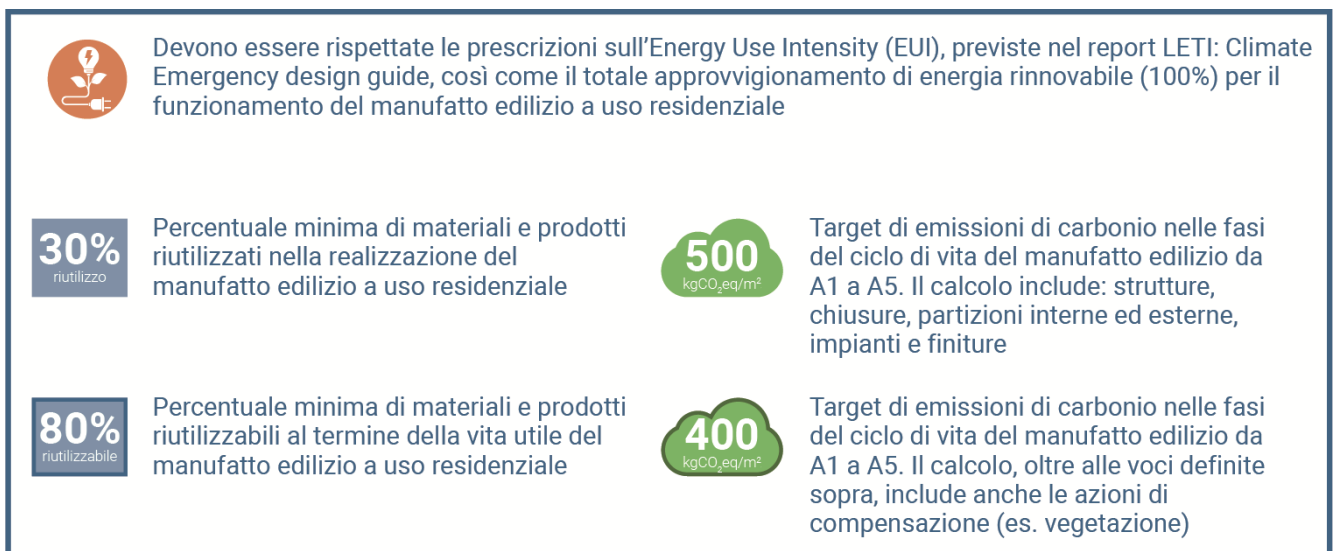


Figura 1.6 – Valori di soglia previsti dalla Guida LETI (elaborazione degli autori su fonte: LETI [11]).

In relazione ad altre tipologie di destinazioni d'uso, sono disponibili dei valori limite decrescenti (applicabili dal 2050 in avanti), tali da prevedere che l'EC sia pari a zero o pari a $-100 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ se si considera l'*off-setting*.

In conclusione, la descrizione di alcuni contenuti dei documenti utilizzati nell'ambito del lavoro di ricerca condotto, concorrono nell'identificare un'esigenza piuttosto chiara, che può essere descritta come necessità di contribuire allo sviluppo di metodi in grado di valutare le emissioni di CO_2 equivalente nel ciclo di vita di un'opera edilizia, a partire dalla fase di progettazione preliminare. Si tratta altresì di procedere alla verifica di nuovi requisiti, che vanno a integrarsi ai requisiti energetici e ambientali esistenti (ad esempio quelli che discendono dalla Direttiva 2010/31/UE). Tale necessità costituisce la base per gli obiettivi di seguito illustrati.

2. Obiettivi

Obiettivo del report tecnico, elaborato dal tavolo Strumenti per la Decarbonizzazione, è di definire una metodologia di riferimento per la determinazione dell'Embodied Carbon di un manufatto edilizio, al fine anche di concorrere a una valutazione *Whole Life Carbon* – fasi da A a C – e *Circular Economy* – fase D. Il report illustra inoltre quali strumenti possono essere utilizzati (banche dati, dichiarazioni ambientali di prodotto – EPD, altre certificazioni ambientali, ecc.) per condurre una valutazione sia in fase di progettazione preliminare sia in fase di progettazione esecutiva e realizzativa.

La contabilizzazione dell'Embodied Carbon fa riferimento ad alcune tipologie di elementi tecnici e di impianto, così come previsto dalle norme tecniche di riferimento, che compongono le parti di un edificio e di un'infrastruttura (si veda paragrafo 5.3). La metodologia illustrata nei successivi capitoli e paragrafi si può applicare a manufatti edilizi nuovi ed esistenti. Per quest'ultima categoria la valutazione

è da riferirsi agli elementi tecnici e di impianto che andranno a integrare o a sostituire quelli esistenti.

Il tavolo ha inoltre avuto il compito di soddisfare alcuni requisiti del progetto BuildingLife [12], definendo i metodi e gli strumenti di calcolo per valutare le emissioni di carbonio nell'intero ciclo di vita di un manufatto edilizio.

Obiettivi specifici

I contenuti del report intendono inoltre soddisfare alcuni obiettivi specifici:

- 1) fornire una definizione di Embodied Carbon (EC) propedeutica allo sviluppo della metodologia di contabilizzazione;
- 2) elaborare un glossario di definizioni complementari alla definizione di Embodied Carbon (ad esempio: Embodied Energy, Operational Carbon, Operational Energy);
- 3) definire il quadro di norme tecniche internazionali e nazionali di riferimento;
- 4) definire i limiti temporali, spaziali e fisici attraverso i quali procedere alla contabilizzazione dell'EC e alla valutazione Whole Life Carbon;
- 5) individuare le modalità con le quali dovranno essere analizzate le fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio;
- 6) valutare gli impatti associati a scenari alternativi in diverse fasi del ciclo di vita di un manufatto.

Il lavoro condotto prevede anche una correlazione con alcuni obiettivi stabiliti dal Green Building Council Italia ovvero:

- 1) realizzare uno studio del parco edilizio nazionale per definire una *baseline* delle emissioni incorporate (Embodied Carbon) degli edifici. Identificando, inoltre, dei *benchmark* di emissioni progressivi;
- 2) analizzare l'effetto positivo che la digitalizzazione può avere nel supportare il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione;
- 3) integrare gli strumenti di certificazione della sostenibilità degli edifici con metodologie per la valutazione dell'impatto ambientale nel ciclo di vita (Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing), allineando gli strumenti GBC Italia a Level(s).

3. Organizzazione del report

Il report si compone di due parti principali.

La prima parte si concentra sulle definizioni, sui riferimenti normativi e sugli elementi che devono e/o possono essere considerati ai fini del processo di contabilizzazione dell'EC e della valutazione Whole Life Carbon. In questa parte del testo si procede con la descrizione dell'indicatore Embodied Carbon, degli altri parametri energetico-ambientali che sono utili alla comprensione dell'indicatore e alla sua valutazione. Sono inoltre indicati quali elementi del manufatto edilizio si presume debbano essere considerati per procedere con lo studio.

La seconda parte del report illustra le singole fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio, e le metodologie specifiche di contabilizzazione dell'Embodied Carbon.

Parte prima – Embodied carbon: definizioni e requisiti

4. Riferimenti normativi e tecnici

Il report è il risultato di un processo di studio di un quadro di norme internazionali, in particolare le norme del gruppo ISO 14000 e del gruppo ISO 15000, che sono

state integrate da documenti tecnici, realizzati da esperti internazionali e nazionali, come illustrato in Figura 1.5.

La Tabella 4.1 fornisce l'elenco degli standard di riferimento e dei rapporti tecnici impiegati per l'elaborazione della metodologia di contabilizzazione della Embodied Carbon (EC).

Normativa	Titolo
Annex 57	Evaluation of Embodied Energy and CO ₂ Equivalent Emissions for Building Construction
Annex 72	Assessing Life Cycle Related Environmental Impacts Caused by Buildings (Ongoing)
CEN/TC 350	Sustainability of Construction Works
ISO 15686-8:2008	Building and constructed assets – Service-life planning – Part 8: Reference service life and service-life estimation
ISO 21930:2017	Sostenibilità negli edifici e nelle opere di ingegneria civile - Regole di base per le dichiarazioni ambientali di prodotti e servizi per l'edilizia
PAS 2050:2008	Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services
PAS 2080:2016	Carbon management in infrastructure
TM65	Embodied carbon in building services: A calculation methodology
TS South Coast Air Quality Management District	South Coast Air Basin (SCAB) fleet average emission factor
TS UK Government conversion factors for company reporting	Emission factor by department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS).
UNI 8290-1:1981	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia
UNI EN 197-1	Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni
UNI EN 15804:2021	Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto
UNI EN 15978:2011	Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici – Metodo di calcolo
UNI EN 16258:2013	Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)
UNI EN 16449: 2014	Wood and wood-based products. Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide

UNI EN 16485:2014	Legno tondo e segati - Dichiarazioni Ambientali di Prodotto - Regole per categoria di prodotto per il legno e i prodotti a base di legno per l'impiego nelle costruzioni
UNI EN 16757:2017	Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements
UNI CEN/TR 17310:2019	Carbonatazione e assorbimento di CO ₂ nel calcestruzzo
UNI EN ISO 14021:2016	Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)
UNI EN ISO 14040:2021	Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento
UNI EN ISO 14044:2021	Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida
UNI EN ISO 14067:2018	Gas ad effetto serra - Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) - Requisiti e linee guida per la quantificazione
UNI EN ISO 14064:2019 - Parte 1	Gas ad effetto serra - Specifiche e guida, al livello dell'organizzazione, per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra e della loro rimozione
UNI EN ISO 14064:2019 - Parte 2	Gas ad effetto serra - Specifiche e guida, al livello di progetto, per la quantificazione, il monitoraggio e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra o dell'aumento della loro rimozione
UNI EN ISO 14064:2019 - Parte 3	Gas ad effetto serra - Specifiche e guida per la validazione e la verifica delle asserzioni relative ai gas ad effetto serra

Tabella 4.1 – Normativa di riferimento.

4.1 Definizioni

4.1.1 Definizione di Embodied Carbon

L'Embodied Carbon (EC) o carbonio incorporato è un indicatore che contabilizza l'anidride carbonica equivalente (CO₂eq) 1) rilasciata, 2) stoccata, 3) rimossa, 4) compensata durante una o più fasi del ciclo di vita di un determinato bene, sia esso un prodotto o un manufatto edilizio. In altre parole, la contabilizzazione identifica una data quantità di sostanza (CO₂, metano, ecc.) e ne valuta il suo contributo in termini di anidride carbonica equivalente,

adottando appositi fattori di conversione¹. Il valore di EC è normalizzato rispetto a un'unità di misura (detta anche funzionale) appropriata. L'unità di misura dell'EC è il chilogrammo di anidride carbonica equivalente (kgCO₂eq), calcolato su un orizzonte temporale solitamente di 100 anni. Il calcolo delle emissioni equivalenti dei prodotti che costituiscono il manufatto edilizio include i rilasci diretti misurabili di un determinato processo produttivo e i rilasci indiretti dovuti alla trasformazione delle risorse energetiche primarie in energia elettrica o risorse energetiche secondarie.

¹ I fattori di conversione sono disponibili sul report IPCC 2013 [13].

La determinazione dell'EC non comprende le emissioni di gas a effetto serra associate al funzionamento di un manufatto edilizio, definite anche come *Operational Carbon* (OC).

In riferimento al ciclo di vita di un manufatto edilizio, l'EC si riferisce alle fasi A (Produzione e Costruzione), B (Uso) e C (Fine Vita), escluse le fasi Operational. Inoltre, è ammissibile valutare separatamente la fase D (Benefici e Impatti) che contempla ulteriori potenziali benefici (riduzioni di CO₂eq) o impatti (aumenti di CO₂eq) oltre il confine del sistema (si veda Figura 1.3).

La fase D può dunque contabilizzare sia i benefici derivanti da operazioni di riciclo, riuso, recupero e compensazione (es. *carbon offset*) sia i carichi ambientali causati da modalità di smaltimento poco virtuose (es. discarica).

La metodologia sviluppata per quantificare, o contabilizzare, le emissioni di CO₂ equivalente, in modo coerente a quanto proposto da alcune fonti bibliografiche o sitografiche (7) fa riferimento a tre tipologie di emissioni (Scopo1, 2 e 3).

Le emissioni di Scopo 1 (*Scope 1*), sono emissioni dirette, associate a un processo di produzione o alla prestazione di un servizio (ad esempio i rilasci di gas a effetto serra della combustione di una caldaia o di una fornace). Le emissioni di Scopo 2 (*Scope 2*) sono emissioni indirette, che corrispondono alla somma delle emissioni di trasporto e produzione delle risorse energetiche e derivate utilizzate nel processo di produzione (ad esempio le emissioni associate alla produzione e al trasporto dell'energia elettrica utilizzata per alimentare la caldaia o la fornace). Le emissioni di Scopo 3 (*Scope 3*) includono altre emissioni indirette associate al ciclo di vita di un generico prodotto o di un servizio. Più precisamente, nel caso di un'azienda le emissioni di Scopo 3 sono rilasci che non vengono direttamente controllati e gestiti. Corrispondono, ad esempio, ai processi di trasporto dei dipendenti o ai

processi di produzione dei materiali acquistati per lo svolgimento di determinate attività.

Con riferimento a un manufatto edilizio è però difficile distinguere tra emissioni di Scopo 2 e di Scopo 3, in fase di contabilizzazione dell'EC. Il processo di produzione dei materiali che si presume verrà impiegato nella realizzazione di un'opera dovrebbe generare emissioni di Scopo 3, mentre il processo di costruzione dovrebbe comportare rilasci di Scopo 2. Tuttavia, è ammissibile che alcune lavorazioni siano appaltate a soggetti terzi, cui corrisponderanno verosimilmente delle emissioni di Scopo 3.

L'EC è dunque da intendere come somma aggregata di tutte e tre le tipologie di emissioni.

Pur nella consapevolezza che il recente quadro normativo sia orientato alla distinzione delle emissioni in tre tipologie, si è ritenuto opportuno (nell'ambito del tavolo di lavoro) mantenere la sola distinzione più generale di emissioni dirette ed emissioni indirette, al fine di quantificare un valore di EC, secondo un approccio comunque coerente con la normativa tecnica illustrata nel paragrafo 5.1.

4.1.2. Glossario

Il Glossario (Tabella 4.2) discende dai riferimenti tecnici e normativi illustrati nel paragrafo 3 del presente report.

STRUMENTI PER LA DECARBONIZZAZIONE: contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio

Termine	Acronimo	Definizione
Bill-of-Quantities	BoQ	Determinazione effettiva dei materiali e prodotti che costituiscono il manufatto edilizio. Si intende altresì la quantità quanto più precisa di materiali e prodotti conferiti al cantiere, cui corrisponderà la produzione di rifiuti derivanti dalle attività di costruzione.
Circular Economy	/	Modello economico di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti: estendendone quindi il ciclo di vita e riducendo al minimo la produzione di rifiuti. In merito alla contabilizzazione dell'Embodied Carbon, la Circular Economy è finalizzata a quantificare e valutare i potenziali benefici o gli eventuali impatti ambientali associati ai processi di reimpiego e/o riciclaggio dei rifiuti e al recupero energetico della componente di Feedstock (vedi Feedstock Energy). La Circular Economy di un manufatto edilizio è valutata nella fase D – Oltre il ciclo di vita – ed è contabilizzata separatamente rispetto alle restanti fasi del ciclo di vita.
Carbonio biogenico	/	Il Carbonio Biogenico corrisponde al contenuto di carbonio da fonti biogeniche (piante o animali). Ai fini della contabilizzazione dell'Embodied Carbon, il Carbonio Biogenico viene considerato un credito di CO ₂ , pertanto preceduto dal segno meno. Nel caso in cui la determinazione dell'Embodied Carbon preveda un processo di combustione della biomassa (ad esempio nella valutazione di uno scenario di dismissione del prodotto) si assume che i rilasci di CO ₂ azzerino il credito acquisito. Ad esempio, per il legno, si considera il carbonio assorbito durante la fase di crescita dell'albero, che rimane idealmente stoccato al suo interno fino al momento in cui il materiale non viene sottoposto a incenerimento. In questo caso, la combustione porta a liberare il carbonio assorbito e ad azzerare il "credito" di CO ₂ definendo un bilancio complessivo pari a zero (fonte: IPCC, 2006 [14]; Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [15]).
Carbon Footprint	CF	La Carbon Footprint (CF) è da intendere come bilancio tra: le emissioni di anidride carbonica equivalente rilasciate in atmosfera e le emissioni di anidride carbonica rimosse dall'atmosfera (attraverso processi di Carbon Capture and Storage o, indirettamente, attraverso la vegetazione). La Carbon Footprint fa riferimento agli standard che definiscono la metodologia Life Cycle Assessment e utilizza come categoria di impatto ambientale il Global Warming Potential, calcolato rispetto a un orizzonte temporale definito (vedi Global Warming Potential). L'Embodied Carbon costituisce quindi una porzione della Carbon Footprint. L'unità di misura della Carbon Footprint è il kgCO ₂ equivalente rispetto a un orizzonte temporale di 100 anni (fonte: UNI EN ISO 14067:2018).
Carbon Off-Setting	CO_S	Misure di compensazione della CO ₂ tramite opere di afforestazione (conversione di siti con differente uso del suolo a nuove foreste) o riforestazione (recupero di terreni classificati come foreste ma attualmente in degrado). Le soluzioni vegetate – conosciute anche con il termine inglese di Nature Based Solution (NBS) – possono riguardare installazione in-site, ovvero nell'area dove sorge il manufatto edilizio, o off-site, ovvero in aree esterne a quella dove sorge il manufatto edilizio.
Categorizzazione delle emissioni di CO ₂ equivalente	/	Le emissioni dirette (vedi Emissioni Dirette) e indirette (vedi Emissioni Indirette) sono categorizzate secondo 3 Scopi: <ul style="list-style-type: none"> • Scopo 1: Tutte le Emissioni Dirette misurate e quantificate per un determinato processo. • Scopo 2: Le Emissioni Indirette dovute all'utilizzo di determinate risorse energetiche per la produzione di elettricità, calore o vapore. • Scopo 3: Altre Emissioni Indirette - derivanti da molteplici operazioni (es. estrazione, trasporto, lavorazione, ecc.) - legate alla catena di approvvigionamento (materiali, risorse e servizi) di un determinato processo produttivo. Tali emissioni possono anche essere associate ad attività (ad esempio il fine vita dei rifiuti) non gestite dal progettista o da altri attori del processo edilizio chiamati a condurre la valutazione. La quantificazione delle emissioni di Scopo 1, Scopo 2 e Scopo 3 consente di determinare il Global Warming Potential (vedi Global Warming Potential) di un processo, di un prodotto e, per estensione, di un edificio (fonte: GreenHouse Gas Protocol [16]).
Design-as-Built	DaB	Determinazione dei materiali e prodotti che costituiscono il manufatto edilizio sulla base di elaborati grafici. Il Design-as-Built non considera le eccedenze di materiali e prodotti come anche i rifiuti da costruzione generati dalle operazioni di cantiere. Nei casi in cui la valutazione dell'EC o della Whole Life Carbon dovesse partire da informazioni Design-as-Built, è necessario adottare un fattore correttivo di produzione, specifico per diversi materiali e prodotti, tale da stimare in fase progettuale la percentuale di scarti originati in cantiere.

Termine	Acronimo	Definizione
Embodied Carbon	EC	L'EC o carbonio incorporato è un indicatore che contabilizza l'anidride carbonica equivalente (CO ₂ eq) 1) rilasciata, 2) stoccata, 3) rimossa, 4) compensata durante una o più fasi del ciclo di vita di un determinato bene, sia esso un prodotto o un manufatto edilizio.
Embodied Energy	EE	L'Embodied Energy (EE) o energia incorporata è un indicatore che contabilizza le risorse energetiche primarie (rinnovabili e non rinnovabili) impiegate in una o più fasi del ciclo di vita di un determinato bene, sia esso un prodotto o un manufatto edilizio, e normalizzate rispetto a un'unità di misura (detta anche funzionale) appropriata. La determinazione dell'EE non comprende l'energia necessaria al funzionamento di un manufatto edilizio, definita anche come Operational Energy (OE). L'unità di misura dell'EE è il kWh o il MJ (fonte: Annex 57, Subtask 1).
Emissioni Dirette di CO ₂ equivalente	/	Le Emissioni Dirette corrispondono ai rilasci misurabili e quantificabili di un determinato processo. Questo tipo di emissioni possono essere calcolate in due modi: 1. in funzione del potere calorifico della fonte energetica utilizzata; 2. in relazione alle reazioni che avvengono in un determinato processo produttivo (es. calcinazione cemento). Le emissioni dirette, legate al processo di combustione della biomassa, sono compensate dal carbonio biogenico (vedi Carbonio Biogenico) (fonte: GreenHouse Gas Protocol [16]).
Emissioni Indirette di CO ₂ equivalente	/	Le Emissioni Indirette coincidono con la somma delle emissioni dovute a trasporti e produzione delle risorse energetiche primarie (es. petrolio, gas naturale, ecc.) e derivate (es. elettricità, diesel, ecc.). La determinazione del loro contributo tiene conto della quantità di risorsa energetica non-rinnovabile (vedi Risorse Primarie Non-Rinnovabili - E) impiegata per la produzione di un determinato bene, e per estensione di un manufatto edilizio, moltiplicandola per il valore di emissione specifica di anidride carbonica (vedi Fattori di emissione specifica). Alle risorse energetiche rinnovabili (vedi Risorse Primarie Rinnovabili - E) non corrispondono emissioni indirette (fonte: GreenHouse Gas Protocol [16]).
Fattori di emissione specifica	/	I Fattori di emissione specifica sono fattori di conversione che consentono di determinare il quantitativo di emissioni di CO ₂ derivanti dall'utilizzo di risorse primarie non-rinnovabili (vedi Risorse Primarie Non-Rinnovabili - E), ovvero, di risorse primarie e derivate impiegate come combustibile in un processo produttivo (fonte: IPCC, 2006 [14]; Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [15]).
Forzante radiativo	/	Il forzante radiativo è la misura dell'influenza di un fattore (in questo caso l'aumento dell'anidride carbonica o altri gas serra nell'atmosfera) nell'alterazione del bilancio tra energia entrante ed energia uscente nel sistema Terra-atmosfera (fonte: IPCC, 2006 [14]).
Feedstock Energy	FE	Tale contenuto è il risultato di un processo in cui le risorse energetiche non sono impiegate per fini energetici, quindi come combustibili. La frazione immagazzinata all'interno del prodotto è da considerarsi una potenziale energia recuperabile sotto forma di "calore per combustione", misurabile attraverso il potere calorifico di una fonte: rinnovabile (biomassa) o non-rinnovabile (fossile). La Feedstock Energy si esprime come somma tra NRPRM (vedi Risorse Primarie Non-Rinnovabili - M) e RPRM (vedi Risorse Primarie Rinnovabili - M). La Feedstock Energy costituisce, di conseguenza, una componente dell'Embodied Energy. L'unità di misura dell'Energia di Feedstock è il kWh o il MJ (fonte: Annex 57, Subtask 1; Giordano, 2010 [17]).
Generic Data	/	Al fine della contabilizzazione dell'Embodied Carbon, i Generic Data si riferiscono a dati generici mediamente rappresentativi di materiali e prodotti da costruzione e riferiti a processi di produzione, trasporto, uso e dismissione.
Global Warming Potential	GWP	Il Global Warming Potential (GWP) è un indicatore che stima l'influenza dei gas a effetto serra sul cambiamento climatico. Tale indicatore utilizza fattori di caratterizzazione attraverso i quali valutare l'impatto di una data quantità di gas serra (ad esempio il metano) rispetto a un equivalente quantità di anidride carbonica (CO ₂ eq). I fattori di equivalenza sono direttamente correlati al forzante radiativo (vedi Forzante radiativo). Il GWP si determina comprendendo sia le emissioni dirette equivalenti (vedi Emissioni Dirette) sia le emissioni indirette equivalenti (vedi Emissioni Indirette). La GWP può dunque assumersi come componente dell'Embodied Carbon. L'unità di misura del GWP è il kgCO ₂ equivalente, rispetto a un orizzonte temporale di 100 anni (fonte: UNI EN ISO 14064:2019; IPCC, 2006 [14]).

STRUMENTI PER LA DECARBONIZZAZIONE:
contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio

Termine	Acronimo	Definizione
Manufatto edilizio		Un manufatto edilizio è una opera non completamente interrata, avente i caratteri di solidità, stabilità ed immobilizzazione al suolo, anche mediante appoggio o incorporazione o collegamento fisso ad un corpo di fabbrica contestualmente realizzato o preesistente, e ciò indipendentemente dal livello di posa ed elevazione dell'opera stessa, dai suoi caratteri e dalla sua destinazione. Per manufatto edilizio si intende sia un'opera con funzione temporanea (ad esempio costruzioni destinate a essere progettate, realizzate e demolite in un arco temporale definito, e comunque non superiore a 1 anno, sia costruzioni destinate a funzioni permanenti, di durata compresa tra 50 e 120 anni).
Materiale riciclato	/	Si considera un materiale o prodotto riciclato che contiene una percentuale in massa di Materia Prima Seconda (MPS). La determinazione in percentuale del contenuto di riciclato è variabile, in relazione alle caratteristiche del materiale o del prodotto finito, della Materia Prima Seconda, delle modalità di riciclaggio cui è sottoposto il rifiuto (open loop recycling o closed loop recycling) e allo sviluppo di tecnologie in grado di valorizzare lo stesso rifiuto in un sistema di produzione. (fonte: ISO 14021: 2016 – Environmental Labels and Declarations).
Risorse Primarie Non-Rinnovabili - Energia	NRPRE	Le Risorse Primarie Non-Rinnovabili - E (NRPRE) sono costituite da fonti energetiche (primarie e derivate) non-rinnovabili utilizzate come combustibile : ad esempio petrolio, gas, carbone, torba. Come risorsa primaria non-rinnovabile è anche incluso l'uranio. Le NRPRE sono componenti attraverso le quali quantificare l'Embodied Energy di un processo, di un prodotto o di un manufatto edilizio. In relazione alla tipologia di NRPRE è possibile determinare l'Embodied Carbon di un processo, di un prodotto o di un manufatto edilizio utilizzando dei fattori di emissione specifica (IPCC 2013) (vedi Fattori di emissione specifica). L'unità di misura dell'NRPRE è il kWh o il MJ (fonte: ISO 21930:2017).
Risorse Primarie Non Rinnovabili - Materiali	NRPRM	Le Risorse Primarie Non-Rinnovabili - M (NRPRM) identificano il contenuto energetico di un materiale o semilavorato o prodotto derivato da risorse primarie come petrolio, carbone e gas (es. plastica, gomma, ecc.). Le NRPRM costituiscono la potenziale quantità di energia recuperabile, sotto forma di calore specifico, di una materia prima che non viene utilizzata come fonte di energia primaria nel processo di produzione (vedi Risorse Primarie Non-Rinnovabili - E). Le NRPRM sono una delle componenti attraverso le quali quantificare l'Embodied Energy di un processo, di un prodotto e, per estensione, di un manufatto edilizio. Per le Materie Prime Secondarie (MPS), il valore NRPRM non deve essere calcolato, poiché già contabilizzato nel ciclo di vita di un altro prodotto. Ne consegue che i valori di EE ed EC siano considerati pari a zero. L'unità di misura dell'NRPRM è il kWh o il MJ (fonte: ISO 21930:2017).
Operational Carbon	OC	L'Operational Carbon (OC) o carbonio operativo è un indicatore che contabilizza le emissioni di anidride carbonica equivalente in fase d'uso, rilasciate per il funzionamento di un manufatto edilizio, e normalizzate rispetto a un'unità di misura (detta anche funzionale) appropriata. Per OC si intende altresì la contabilizzazione delle emissioni di CO ₂ eq associate al consumo di energia per azionare gli impianti o le attrezzature a servizio del manufatto edilizio (es. riscaldamento e raffrescamento, illuminazione, ventilazione, elettrodomestici, ecc.). L'OC deve essere contabilizzata separatamente rispetto all'Embodied Carbon (EC). L'unità di misura del OC è il kgCO ₂ equivalente.
Operational Energy	OE	L'Operational Energy (OE) o energia operativa è un indicatore che contabilizza le risorse energetiche primarie (rinnovabili e non rinnovabili) impiegate nella fase d'uso per il funzionamento di un manufatto edilizio, e normalizzate rispetto a un'unità di misura (detta anche funzionale) appropriata. Per OE si intende altresì la contabilizzazione del consumo energetico per azionare gli impianti o le attrezzature a servizio del manufatto edilizio (es. riscaldamento e raffrescamento, illuminazione, ventilazione, elettrodomestici, ecc.). L'unità di misura dell'OE è il kWh o il MJ.

² (Corte di Cassazione, Sezione civile, Sez. II, 3 gennaio 2013, n. 72).

Termine	Acronimo	Definizione
Risorse Primarie Rinnovabili - Energia	RPRE	Le Risorse Primarie Rinnovabili - E (RPRE) sono costituite da una fonte energetica rinnovabile utilizzata come combustibile . Le RPRE comprendono le fonti idroelettriche, fotovoltaiche, eoliche e geotermiche nonché le biomasse. Le RPRE sono componenti attraverso le quali quantificare l'Embodied Energy di un processo, di un prodotto e, per estensione, di un manufatto edilizio. Per una RPRE il valore di Embodied Carbon è da considerare uguale a zero sia nel caso di biomassa (poiché si assume che la CO ₂ stoccata nella risorsa energetica venga interamente valorizzata nel processo di combustione) sia nel caso di altre risorse energetiche. L'unità di misura dell'RPRE è il kWh o il MJ (fonte: ISO 21930:2017).
Risorse Primarie Rinnovabili - Materiali	RPRM	Le Risorse Primarie Rinnovabili - M (RPRM) identificano il contenuto energetico di un materiale, semilavorato o prodotto di origine naturale (es. legno, canapa, ecc.). Le RPRM costituiscono la potenziale energia recuperabile, sotto forma di calore specifico, di una materia prima (vedi Feedstock Energy) che non viene utilizzata come fonte di energia nel processo di produzione (vedi Risorse Primarie Rinnovabili - E). Le RPRM sono componenti attraverso le quali quantificare l'Embodied Energy di un processo, di un prodotto e, per estensione, di un manufatto edilizio. Per le Materie Prime Secondarie (MPS), il valore RPRM non deve essere calcolato, poiché già contabilizzato nel ciclo di vita di un altro prodotto. Ne consegue che i valori di EE ed EC siano considerati pari a zero. L'unità di misura dell'RPRM è il kWh o il MJ (fonte: ISO 21930:2017).
Scenario temporale di riferimento	/	La contabilizzazione dell'Embodied Carbon nella fase d'uso (B) può variare sensibilmente in relazione a: destinazione d'uso del manufatto, caratteristiche strutturali, caratteristiche dei materiali e prodotti, ecc. Lo scenario temporale di riferimento rappresenta il periodo di tempo, in cui si stima che il manufatto edilizio sia in grado di svolgere le funzioni per le quali è stato progettato e realizzato, entro il quale determinare l'EC. Lo scenario temporale di riferimento può non coincidere con il ciclo di vita di un manufatto edilizio.
Specific Data	/	Al fine della contabilizzazione dell'Embodied Carbon, gli Specific Data si riferiscono a dati specifici di materiali e prodotti (es. cartongesso prodotto dall'azienda X) presenti su documenti tecnici (es. EPD, PEF, Carbon Footprint, studi LCA) prelevati da banche dati e database o resi disponibili dal produttore.
Whole Life Carbon	WLC	La contabilizzazione (termine mutuato dall'inglese "Accounting") delle emissioni di CO ₂ equivalenti nel ciclo di vita di un manufatto edilizio conduce a una valutazione definita Whole Life Carbon Assessment. Si tratta, altresì, di un bilancio di carbonio che considera sia le emissioni Operational, determinate in funzione dei fabbisogni energetici per la climatizzazione, l'illuminazione e l'acqua calda sanitaria, sia le emissioni Embodied, riferite alle restanti fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio.

Tabella 4.2 – Glossario del tavolo Strumenti per la Decarbonizzazione.

5. Requisiti per la contabilizzazione dell'Embodied Carbon

Questa sezione del report intende definire quali sono gli elementi che è opportuno considerare nella contabilizzazione dell'Embodied Carbon e, successivamente, della Whole Life Carbon di un manufatto edilizio.

In particolare, il capitolo 5 indica quali sono:

- le fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio che si dovrebbero includere nell'analisi;
- le caratteristiche del metodo BASE e del metodo avanzato AVANZATO per la contabilizzazione dell'EC, da utilizzare in fase di progettazione preliminare, esecutiva e di realizzazione del manufatto edilizio;
- i materiali, gli elementi tecnici e gli elementi di impianto che si raccomanda di contemplare nell'analisi;
- le tipologie di manufatti che possono essere oggetto di analisi;
- gli scenari temporali di riferimento che si dovrebbero utilizzare ai fini dell'analisi;
- le unità di misura (o funzionali) da utilizzare nel processo di analisi;
- i database per la contabilizzazione.

5.1 Fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio

Fasi A-C – Embodied Carbon e Whole Life Carbon

La Tabella 5.1 indica le fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio che dovrebbero essere considerate nel processo di analisi e valutazione dell'Embodied Carbon e ai fini della determinazione della Whole Life Carbon.

Il testo contenuto nella tabella costituisce un adattamento del: *“Project Life Cycle Information”* riportato all'interno della EN 15978: 2011.

La tabella propone una distinzione tra processi “raccomandati”, che dovrebbero essere sempre contemplati nella valutazione, e processi “facoltativi”, ovvero, che si possono considerare come accessori o caratterizzati da un certo livello di complessità e, in ragione di ciò, ragionevolmente trascurabili.

A questi si aggiunge il cosiddetto ambito minimo di applicazione (si veda l'omonimo box riportato successivamente). L'ambito minimo stabilisce che la determinazione dell'EC debba almeno considerare le fasi A1-A3, pur con la consapevolezza che uno studio parziale compromette la valutazione Whole Life Carbon. In altre parole, si tratta di una verifica minima delle emissioni di CO₂eq rilasciate dai processi che hanno portato alla produzione dei materiali e dei prodotti necessari alla realizzazione del manufatto edilizio.

Fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio che si raccomanda di includere nella contabilizzazione dell'EC			Raccomandato	Facoltativo	Ambito minimo di applicazione	Non applicabile
Fasi del ciclo di vita	Produzione (A1-A3)	Estrazione materie prima (A1)	•		•	
		Trasporto al sito produttivo (A2)	•		•	
		Produzione (A3)	•		•	
	Costruzione (A4-A5)	Trasporto al cantiere (A4)	•			
		Costruzione (A5)	•			
	Uso (B1-B7)	Uso (B1)		•		
		Manutenzione (B2)		•		
		Riparazione (B3)		•		
		Sostituzione (B4)	•			
		Ristrutturazione (B5)	•			
		Fabbisogno di energia per la fase d'uso (Operational - B6)				•
		Fabbisogno idrico per la fase d'uso (Operational B7)				•
	Fine vita (C1-C4)	Deconstruzione e Disassemblaggio (C1)	•			
		Trasporto al sito di trattamento rifiuti (C2)	•			
		Trattamento rifiuti (C3) ove presente	•			
		Smaltimento (C4)	•			

Tabella 5.1 – Fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio oggetto del processo di contabilizzazione dell'Embodied Carbon.

In linea di principio le fasi raccomandate dovrebbero essere contemplate sia in fase di progettazione preliminare sia in fase di progettazione esecutiva (si veda il paragrafo 5.2), utilizzando, in relazione al contesto di elaborazione del progetto, un sistema di riferimenti appropriato (si veda il paragrafo 5.7).

Fase D – Circular Economy

In accordo con lo standard 15978:2011 è anche possibile prevedere un'ulteriore fase in grado di analizzare e valutare Benefici e Impatti oltre il confine del sistema. Questa fase, come descritto nel capitolo introduttivo, è da considerare come una valutazione di potenziali scenari di circolarità di materiali e

prodotti previsti in progetto e in fase di realizzazione di un manufatto edilizio.

In altre parole, lo studio si riferisce a operazioni di riciclo, riuso, recupero, a cui i materiali e i prodotti possono essere sottoposti a valle del processo di demolizione e trasformazione dei rifiuti (C1-C4).

La fase D è richiesto venga calcolata in modo indipendente dalle precedenti fasi, poiché attiene a scenari potenziali di valorizzazione dei rifiuti da Costruzione e Demolizione che:

- possono non essere di competenza di chi ha in carico la progettazione e la realizzazione del

manufatto;

- si riferiscono a processi che potenzialmente si verificheranno in una fase successiva al ciclo di vita atteso del manufatto edilizio;
- si basano su tecnologie attuali di recupero e riciclaggio che nel futuro potranno essere oggetto di sviluppo e miglioramento.

Sempre in questa fase, si raccomanda di inserire i potenziali benefici derivanti da progetti di compensazione tramite vegetazione (*carbon off-set*) o

altra soluzione (es. *Carbon Capture&Storage*, ecc.).

La valutazione della fase D in fase di progettazione può verificarsi nel caso si preveda la demolizione di un fabbricato esistente e/o la sostituzione di materiali e prodotti nelle fasi iniziali di ristrutturazione. La valutazione viene dunque anticipata all'anno zero, ovvero quello di ristrutturazione del manufatto. Anche in questo caso, la contabilizzazione dell'EC è da tenere separata dalla contabilizzazione delle fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio che vanno dalla A alla C.

Ambito minimo di applicazione

In assenza di dati che consentano la determinazione di tutte le fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio, si raccomanda di considerare nella valutazione dell'EC almeno le fasi comprese tra A1 e A3.

Tale ambito minimo di applicazione è da ricondurre alle seguenti ragioni:

- Le emissioni di anidride carbonica equivalente associate alla fase di produzione di un manufatto edilizio saranno rilasciate in atmosfera prima del 2050, ed è pertanto sulla loro quantità che è necessario individuare le azioni di mitigazione, ad esempio la compensazione attraverso l'impiego di fonti rinnovabili nella fase B6, oppure, attraverso tecniche di *off-setting* e *carbon sequestration*;
- La contabilizzazione di queste fasi si basa su dati diretti (esperiti in fase di acquisto dei materiali e dei prodotti), oppure, su fonti dati (sufficientemente) disponibili (si veda paragrafo 5.7 "*Database per la contabilizzazione*");
- La contabilizzazione delle fasi comprese tra la B e la C fa per lo più riferimento a scenari potenziali; pertanto, caratterizzate da un certo margine di incertezza;
- Per alcune tipologie di EPD (antecedenti alla EN 15804, aggiornata al 2019), le informazioni disponibili si riferiscono alle fasi di produzione dei materiali e prodotti.

5.2 Metodo di contabilizzazione BASE e metodo AVANZATO

La determinazione dell'EC è da intendersi come un processo di valutazione sequenziale, contraddistinto da diverse fasi di analisi e approfondimento, sulla base dello stato di avanzamento del progetto: preliminare ed esecutivo.

Le valutazioni sull'EC, pertanto, si contraddistinguono secondo un duplice approccio.

La fase preliminare è caratterizzata da un metodo BASE di valutazione dell'EC di un manufatto edilizio; la fase esecutiva fa invece riferimento a un approccio di tipo AVANZATO, in cui i materiali e le tecnologie si riferiscono a prodotti specifici, identificati all'interno di documenti a corredo del progetto così come a informazioni dettagliate inerenti macchinari, mezzi di trasporto e impianti a servizio dell'edificio.

La valutazione inerente alla fase di progettazione preliminare - metodo BASE - è raccomandata per stimare le possibili emissioni di carbonio del progetto e, di conseguenza, identificare possibili azioni per ridurre gli impatti (es. sostituzione di materiali a elevata EC).

Ulteriori valutazioni in fasi successive del progetto (progettazione esecutiva) sono consigliabili per monitorare progressivamente il bilancio di carbonio - metodo AVANZATO - al fine di definire, più precisamente, l'impronta di carbonio del manufatto edilizio.

In Figura 5.1 sono illustrati gli approcci BASE e AVANZATO, e il loro confronto in termini di:

- 1) coinvolgimento delle figure professionali connesse alla realizzazione di un manufatto edilizio, siano esse il produttore dei materiali da costruzione, il progettista degli impianti e servizi, la stazione appaltante addetta alle operazioni di cantiere, ecc.;
- 2) complessità di elaborazione dell'EC; in tal senso, si evince come l'approccio AVANZATO sia meno complesso dell'approccio BASE, in virtù della possibilità di attingere a dati riconducibili a certificazioni di prodotto – ad esempio le Environmental Product Declaration (EPD) – così come a informazioni più precise in merito alle diverse fasi che compongono il ciclo di vita di un manufatto edilizio;
- 3) livello di dettaglio e approfondimento dei dati e dell'analisi.

	Metodo BASE			Metodo AVANZATO		
Coinvolgimento produttore/progettista	■	□	□	■	■	□
Complessità di elaborazione	■	■	□	■	□	□
Livello di dettaglio	■	□	□	■	■	■

Figura 5.1 – Confronto tra metodi di calcolo BASE e AVANZATO: coinvolgimento di esperti, complessità e livelli di dettaglio dei dati (elaborazione degli autori).

5.3 Materiali, Elementi tecnici ed Elementi di impianto

In linea di principio, uno studio dell'EC dovrebbe contemplare la totalità dei materiali e dei prodotti che contribuiscono alla realizzazione e manutenzione di un manufatto edilizio durante tutte le fasi del suo ciclo di vita; è tuttavia difficile programmare un processo di valutazione così puntuale.

Vi è dunque l'esigenza di procedere con una selezione appropriata di elementi tecnici e di impianto, identificando quelli che dovrebbero essere sistematicamente oggetto di valutazione – pertanto raccomandati - e quelli per i quali la valutazione può essere facoltativa.

La Tabella 5.2, applicabile sia nel metodo BASE sia nel metodo AVANZATO, è stata elaborata sulla base delle norme e dei documenti di cui alla Tabella 4.1 e in conformità alla norma UNI 8290-1:1981.

	Lavorazioni	Classi di unità tecnologica	Unità tecnologiche	Elementi inclusi nel calcolo	Raccomandato	Facoltativo
-	Demolizioni preliminari	/	/	<ul style="list-style-type: none"> • Grandi opere di demolizione • Trattamento rifiuti 		•
0	Opere preliminari	/	/	<ul style="list-style-type: none"> • Opere temporanee e preparatorie • Preparazione del sito 		•
1	/	Struttura portante	1.1. Struttura di fondazione	<ul style="list-style-type: none"> • Fondazioni dirette • Fondazioni indirette 	•	
			1.2. Struttura di elevazione	<ul style="list-style-type: none"> • Elevazioni verticali • Elevazioni orizzontali e inclinate • Elevazioni spaziali 	•	
			1.3. Struttura di contenimento	<ul style="list-style-type: none"> • Contenimenti verticali • Contenimenti orizzontali 	•	
2	/	Chiusura	2.1. Chiusura verticale	<ul style="list-style-type: none"> • Pareti perimetrali verticali • Infissi esterni verticali 	•	
			2.2. Chiusura orizzontale inferiore	<ul style="list-style-type: none"> • Solai a terra • Infissi orizzontali 	•	
			2.3. Chiusura orizzontale su spazi esterni	<ul style="list-style-type: none"> • Solai su spazi aperti 	•	
			2.4. Chiusura superiore	<ul style="list-style-type: none"> • Coperture • Infissi esterni orizzontali 	•	

	Lavorazioni	Classi di unità tecnologica	Unità tecnologiche	Elementi inclusi nel calcolo	Raccomandato	Facoltativo
3	/	Partizione interna	3.1. Partizione interna verticale	<ul style="list-style-type: none"> • Pareti interne verticali • Infissi interni verticali • Elementi di protezione 	•	
			3.2. Partizione interna orizzontale	<ul style="list-style-type: none"> • Solai • Soppalchi • Infissi interni orizzontali 	•	
			3.3. Partizione interna inclinata	<ul style="list-style-type: none"> • Scale interne • Rampe interne 	•	
4	/	Partizione esterna	4.1. Partizione esterna verticale	<ul style="list-style-type: none"> • Elementi di protezione • Elementi di separazione 	•	
			4.2. Partizione esterna orizzontale	<ul style="list-style-type: none"> • Balconi e logge • Passerelle 	•	
			4.3. Partizione esterna inclinata	<ul style="list-style-type: none"> • Scale esterne • Rampe esterne 	•	
5	/	Impianto di fornitura servizi	/	/	•	
6	/	/	/	<ul style="list-style-type: none"> • Manufatti edilizi prefabbricati 	•	
7	Operazioni su edifici esistenti	/	/	<ul style="list-style-type: none"> • Demolizioni selettive • Integrazioni e modifiche 		•
8	Operazioni esterne	Attrezzatura esterna	/	<ul style="list-style-type: none"> • Lavori di preparazione del sito 		•
				<ul style="list-style-type: none"> • Strade, sentieri, pavimentazioni e rivestimenti 		•
				<ul style="list-style-type: none"> • Recinzioni, ringhiere e muri 		•
				<ul style="list-style-type: none"> • Impianti e servizi esterni 		•
				<ul style="list-style-type: none"> • Opere edili minori e edifici accessori 		•

Tabella 5.2 – Quadro sinottico degli elementi materici inclusi nella valutazione dell'Embodied Carbon di un manufatto edilizio.

Sono inoltre da ritenere facoltativi ai fini della valutazione i seguenti elementi di impianto:

- Impianto idrosanitario;
- Impianto di smaltimento liquidi;
- Impianto di smaltimento aeriformi;
- Impianto di smaltimento solidi;
- Impianto di elettrico;
- Impianto di telecomunicazioni;
- Impianto fisso di trasporto;
- Impianto di messa a terra;
- Impianto antincendio;
- Impianto parafulmine;
- Impianto antifurto e antintrusione;
- Arredi domestici già compresi nella progettazione preliminare di un manufatto edilizio (ad esempio pareti contenitore);
- Blocchi servizi;
- Arredi esterni;
- Allestimenti esterni.

Nel caso il manufatto edilizio abbia una funzione strutturale (ad esempio un ponte) la selezione degli elementi raccomandati e facoltativi può essere oggetto di un'ulteriore implementazione, in relazione alla tipologia di opera considerata e in conformità al sistema di classificazione corrispondente; rimane però invariata la priorità - nel processo di valutazione - di considerare i materiali e i prodotti destinati a garantire le prestazioni meccaniche (ad esempio, resistenza a compressione, taglio, flessione, ecc.).

La contabilizzazione di materiali e prodotti aventi specifiche funzioni di messa in sicurezza del manufatto, a fronte di comprovate e documentate esigenze sono da conteggiare a parte; in particolare, non devono concorrere alla determinazione della Whole Life Carbon.

In generale, le indicazioni sulla contabilizzazione dell'EC fornite sono applicabili sia ad azioni di tipo temporaneo (ad esempio, elementi provvisori) sia di tipo permanente (ad esempio, adeguamenti antisismici sulle parti strutturali).

Esclusioni e deroghe

Eventuali esclusioni nella selezione dei materiali e dei prodotti sono da riferire a indicazioni specifiche di natura normativa, ad esempio a criteri e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici (si veda il DM requisiti minimi [18]).

Possono inoltre essere fuori dal campo di applicazione gli interventi di ripristino dell'involucro edilizio che coinvolgono unicamente strati di finitura, interni o esterni, o il rifacimento di porzioni di intonaco che interessino una superficie inferiore al 10% della superficie complessiva di involucro e partizione dell'edificio.

È facoltà del valutatore prevedere che interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria su singole unità abitative (singoli appartamenti) possano essere oggetto di deroga dal processo di contabilizzazione e valutazione dell'EC, se comporta solo interventi sulle partizioni interne e opere di finitura.

Infine, laddove si renda necessaria l'esclusione di alcuni elementi tecnici e di impianto, ciò è ammesso purché tale omissione sia opportunamente documentata (ad esempio, indisponibilità di dati, scarsa affidabilità della fonte dati, ecc.)

Criteri per la selezione dei materiali e dei prodotti

Il paragrafo 5.3 definisce un elenco di elementi, in particolare di elementi tecnici e di impianto, suddivisi tra "raccomandati" e "facoltativi", che si richiede vengano contemplati ai fini della valutazione dell'Embodied Carbon e della Whole Life Carbon di un manufatto edilizio.

Il manufatto è dunque da intendere come un'aggregazione di elementi, dove ciascun elemento è costituito da materiali e prodotti.

La selezione dei materiali e dei prodotti ai fini della contabilizzazione non avviene, quindi, sulle quantità totali (in tonnellate, metri cubi, ecc.) degli stessi materiali e prodotti che arrivano al cantiere (ad esempio le tonnellate totali di acciaio, di cemento, ecc.) ma sulle quantità impiegate per realizzare un elemento tecnico o di impianto.

Tale processo di selezione è da ricondurre in parte alla normativa tecnica assunta come riferimento (UNI 8290-1:1981) e in parte all'intenzione di includere nel processo di valutazione un numero elevato di materiali e di prodotti, comprendendo quelli classificati come leggeri, ovvero a basso peso specifico.

In particolare, per un elemento tecnico e di impianto, indipendentemente dalla sua classificazione in "raccomandato" o "facoltativo", i materiali e i prodotti da includere nel calcolo dovrebbero costituire almeno il 95% del peso del totale dello stesso elemento tecnico (o impianto).

In fase di progettazione (preliminare ed esecutiva) è consuetudine eseguire un'analisi della massa rispetto all'unità di superficie (kg/m^2) o a un'unità di tipo lineare (kg/m). Nel caso dell'unità di superficie, si tratta di determinare la percentuale di materiale e di prodotto rispetto alla massa totale dell'elemento tecnico (100%) normalizzata sul metro quadrato. Per i materiali e i prodotti (ad esempio viti, guarnizioni, tasselli, ecc.) che incidono per meno del 5% in peso rispetto al peso dell'elemento tecnico, si raccomanda di associare

ad essi un solo valore di EC (+ 5%) che dovrebbe corrispondere all'EC del materiale e/o del prodotto che incide maggiormente nel bilancio di CO_2eq dell'elemento tecnico considerato, con riferimento alle fasi A1-A3 del ciclo di vita del manufatto edilizio. Tale valore non può essere associato alla componente biogenica dell'EC; pertanto, non può assumere un valore negativo.

Nei casi in cui il peso dei materiali e dei prodotti non possa essere ricondotto all'unità di superficie, un'analoga modalità di contabilizzazione e valutazione potrà essere adottata per i materiali e i prodotti che costituiscono un metro lineare di elemento tecnico (si pensi ad esempio a elementi con funzione strutturale come pilastri, fondazioni puntuali, travi, ecc.).

Il criterio di assegnazione di una quota supplementare del 5% del materiale e/o del prodotto, che incide maggiormente nel bilancio di CO_2eq dell'elemento tecnico, è necessario che venga condotta per tutte le fasi (dalla A alla C) contemplate nella valutazione.

Nel caso in cui la valutazione dell'Embodied Carbon e della Whole Life Carbon non possa essere riferita agli elementi tecnici del manufatto edilizio ma alle sole quantità di materiali e di prodotti aggregati, indipendentemente dalle loro specifiche funzioni (ad esempio, la quantità di calcestruzzo complessivamente impiegato in fase di realizzazione, senza che questa sia allocata negli elementi tecnici), la modalità di selezione non cambia. Si procederà pertanto a identificare quali materiali e prodotti concorrono per il 95% in peso alla realizzazione del manufatto. Al restante 5% (adottando un approccio precauzionale) dovrebbe essere assegnato il valore di EC corrispondente al materiale e/o prodotto che incide maggiormente nel bilancio di CO_2eq del manufatto, con riferimento alle fasi A1-A3. Anche in questo caso questa percentuale non può essere associata alla componente di EC biogenica.

Inoltre, la selezione dei materiali e prodotti che concorrono alla quantificazione del 5% **non** contempla

quelli che incidono per più del 20% sulla superficie (m²) totale delle seguenti classi di unità tecnologiche: 1) strutture; 2) chiusure verticali; 3) partizioni esterne e interne. Tale affinazione, da adottare nel criterio di selezione, evita che materiali e prodotti con basso peso specifico e con un'elevata incidenza superficiale (che in altre parole possono influenzare l'impatto ambientale delle fasi di trasporto al cantiere, di costruzione, di manutenzione, di sostituzione e di dismissione) siano ricondotti a materiali e prodotti con alto peso specifico.

Nella seconda parte del report, la tabella 6.2 illustra un esempio di come procedere all'inclusione e all'esclusione di materiali e prodotti, in relazione alla loro incidenza percentuale in peso (kg/m²).

Infine, nel processo di contabilizzazione dell'EC non è necessario contemplare materiali e prodotti provvisori, propedeutici alla realizzazione del manufatto edilizio. È il caso, ad esempio, di casseri per il getto del calcestruzzo o altre opere finalizzate alla fase di costruzione e/o demolizione dello stesso manufatto.

5.4 Tipologie di manufatti

Le linee guida metodologiche – sia per il metodo BASE sia per il metodo AVANZATO – possono essere applicate a differenti tipologie di manufatti edilizi.

In conformità con la descrizione riportata nel glossario, il termine manufatto edilizio è da ritenere comprensivo del numero di destinazioni d'uso comprese nel Testo Unico dell'Edilizia [19] e in altri documenti di riferimento preparati dagli Enti preposti (ad esempio, PRGC, regolamenti edilizi, criteri ambientali, ecc.).

Sono inoltre da considerarsi manufatti edilizi le costruzioni comprese nella classificazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni [20]; la valutazione dell'EC può pertanto riguardare opere con funzioni strutturali (ad esempio, ponti, reti ferroviarie, reti viarie, ecc.). Anche per questa categoria di manufatti si raccomanda di procedere con una scomposizione in elementi tecnici ed elementi di

impianto, così come riportato nel paragrafo 5.3. Laddove questo non sia possibile, è ammissibile procedere alla contabilizzazione dell'EC sulla base delle quantità di materiali e prodotti che si prevede vengano conferiti in cantiere (o in più cantieri) – il cosiddetto calcolo dell'EC con informazioni *Bill-of-Quantity* – oppure di quelli previsti nella realizzazione di porzioni omogenee del manufatto – vale a dire, il calcolo dell'EC con informazioni *Design-as-Built*.

Sempre in riferimento al Testo Unico dell'Edilizia la valutazione dell'EC può riguardare:

- la manutenzione ordinaria;
- la manutenzione straordinaria;
- il restauro e risanamento conservativo;
- la ristrutturazione edilizia;
- la nuova costruzione.

In relazione alla tipologia di intervento sopra elencata si procede alla individuazione e alla selezione degli elementi tecnici e degli elementi di impianto oggetto di analisi e valutazione e al loro confronto rispetto alla classificazione di cui alla tabella 5.2.

Nel caso specifico della manutenzione ordinaria la contabilizzazione e la valutazione dell'EC è da riferire a tutti gli interventi di sostituzione, installazione, rifacimento e nuova realizzazione di porzioni del manufatto edilizio, comprese le pertinenze (ad esempio la pavimentazione del cortile).

In relazione alle altre tipologie di intervento, rientrano nel processo di selezione tutti i materiali e i prodotti, che portano alla realizzazione degli elementi tecnici e di impianto: 1) nuovi; 2) che integrano gli esistenti; 3) che vanno a sostituirli.

Nei progetti di nuova costruzione si considera il sito sgombrato, ovvero privo di artefatti o costruzioni da sottoporre a demolizione. È infatti consuetudine che i lavori di demolizione e movimentazione terra siano

condotti in modo indipendente dai lavori di realizzazione di un nuovo manufatto. Qualora tali attività siano invece da comprendere nel processo di valutazione, l'EC del processo di demolizione della costruzione preesistente potrà essere contabilizzata come fase C1 (anticipata all'anno zero, ovvero quello di realizzazione del manufatto), mentre, l'EC del processo di movimentazione terra potrà essere contabilizzato come fase A5 (andando pertanto a sommarsi ai processi finalizzati alla realizzazione del nuovo manufatto).

La demolizione di elementi di impianto e preesistenti la successiva dismissione è da considerare facoltativa.

Nei progetti di ristrutturazione, laddove la superficie interessata dall'intervento sia superiore ai 500 m² di superficie utile lorda³, la contabilizzazione dell'EC si riferisce ai materiali e prodotti che vanno a integrare e sostituire quelli esistenti. Per i materiali e prodotti facenti parti del manufatto originario soggetti a demolizione e rimozione, l'EC potrà essere contabilizzata come fase C (anticipata all'anno zero, ovvero quello di ristrutturazione del manufatto). Anche in questo caso, la demolizione di elementi di impianto e la successiva dismissione è da considerare facoltativa.

Il metodo di contabilizzazione e valutazione - BASE e AVANZATO - si applica anche a tipologie di manufatti prefabbricati, aventi funzioni e durate temporanee. È,

inoltre, applicabile a porzioni del manufatto nuovo ed esistente (ad esempio singoli elementi tecnici o gruppi di materiali).

5.5 Confini temporali del processo di contabilizzazione

La norma EN 15978:2011 stabilisce che la fase B (Uso) coincida con quella in cui il manufatto è in grado di svolgere gli usi per i quali è stato progettato e realizzato.

In particolare, il processo di contabilizzazione dell'EC - attraverso il metodo BASE e attraverso il metodo AVANZATO - prevede che si determinino le emissioni di CO₂ equivalenti per le fasi d'uso (B1), manutenzione (B2), riparazione (B3), sostituzione (B4) e ristrutturazione (B5).

La determinazione dell'EC delle fasi B1-B5 può variare in modo sensibile in relazione a: destinazione d'uso del manufatto, caratteristiche strutturali; caratteristiche dei materiali e dei prodotti.

Esistono tuttavia alcuni documenti che, ai fini della valutazione nel progetto preliminare possono essere utilizzati (Tab. 5.3) e che stabiliscono uno scenario temporale di riferimento entro il quale determinare l'EC.

Tipologia	Scenario temporale di riferimento	Fonte
Edifici temporanei	Coincide con la durata dell'evento per il quale l'edificio è stato realizzato, o una volta cessata la sua funzione	n.a.
Manufatti edilizi con funzioni abitativa	Minimo 50 anni, massimo 60 anni	Level(s) [21]; PEF [22] BREEAM [23]; UNI EN 15804:2021; RICS [9]
Manufatti edilizi con funzione strutturale	120 anni	PAS 2080: 2013; RICS [9]

Tabella 5.3 – Scenari temporali di riferimento per la contabilizzazione e valutazione dell'EC nelle fasi B1-B5.

³ Dato ricavato sulla base dei contenuti della proposta di revisione della direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD) - https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c51fe6d1-5da2-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF

Vi è da sottolineare che lo scenario temporale di riferimento non coincide con il ciclo di vita atteso di un manufatto edilizio, che può essere più lungo o più breve. Si tratta, cioè, del periodo nel quale è opportuno condurre la contabilizzazione e la valutazione. Tale scenario consente di:

- comparare due progetti o due realizzazioni al fine di valutarne le prestazioni di termini di CO₂ equivalente;
- valutare gli effetti delle sostituzioni (*replacement*) di materiali e prodotti in cui il ciclo di vita è inferiore a quello dello stesso scenario temporale di riferimento;
- utilizzare valori di CO₂ equivalente che sono compresi nello scenario previsto stabilito dall'IPCC [13];
- studiare le prestazioni di un manufatto edilizio in un periodo coerente con gli obiettivi di decarbonizzazione del settore delle costruzioni entro il 2050, e negli anni a venire.

Nel caso il manufatto edilizio abbia un ciclo di vita utile superiore a quello stabilito dal presente report, è facoltà del valutatore inserire informazioni supplementari sulla contabilizzazione e valutazione dell'EC.

Qualora, invece, il manufatto edilizio abbia un ciclo di vita inferiore a quello indicato in Tabella 5.3, è possibile far coincidere il ciclo di vita atteso con lo scenario temporale di riferimento.

5.6 Unità di misura per la contabilizzazione

Ai fini della contabilizzazione e valutazione dell'EC è necessario che si adotti un'unità di misura appropriata.

Il quadro normativo utilizzato nell'ambito di questo report definisce:

- 1) l'unità funzionale – functional unit (EN ISO 14040, EN 15804, EN 15978), come unità di misura attraverso la quale quantificare e valutare le prestazioni ambientali di un materiale o di un prodotto. Alla unità funzionale sono riferiti il flusso di input e di output, considerati nello studio Life Cycle Assessment - LCA;
- 2) unità dichiarata - declared unit (EN 15804, EN 15978), come quantità di un prodotto edilizio da utilizzare come unità di riferimento per una EPD o per altra dichiarazione ambientale;
- 3) processo unitario – unit process (EN ISO 14040), come processo considerato nell'analisi dell'inventario del ciclo di vita per il quale si procede con la quantificazione dei flussi di input e output. Ogni processo unitario è infatti concepito come un sistema chiuso all'interno di un sistema più ampio, chiamato sistema ambiente. Quest'ultimo mette a disposizione i flussi di materie e di risorse energetiche (input) e "accoglie" i flussi in uscita (output), denominati anche rilasci, nonché i prodotti finiti o i semilavorati; questi ultimi possono, a loro volta, diventare flussi di input di un successivo processo unitario.

Più in dettaglio, ai flussi di input corrispondono: risorse energetiche primarie o derivate, materie prime, materiali intermedi ed eventuali materie prime seconde. Ai flussi di output corrispondono: rilasci in acqua, suolo (rifiuti) e aria, materiali e prodotti intermedi, oppure, finiti (figura 5.2).

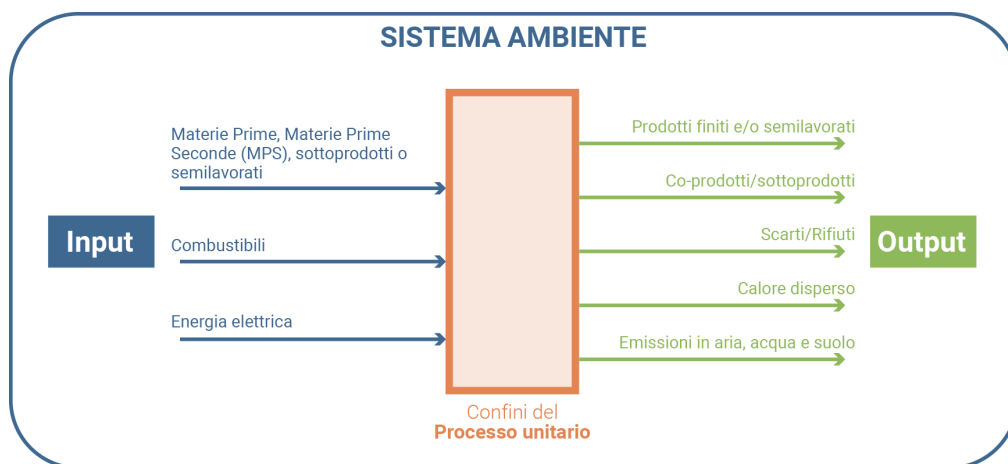


Figura 5.2 – illustrazione di un processo unitario, delimitato dal sistema ambiente. Il sistema ambiente mette a disposizione i flussi di input e riceve i flussi di output (elaborazione degli autori).

Ciascuna delle unità descritte è utile alla contabilizzazione e alla valutazione delle fasi comprese tra A e D. È dunque importante che tali unità siano sistematicamente indicate e/o verificate sia nel processo di valutazione con il metodo BASE sia con il metodo AVANZATO.

Ai fini della comparazione tra uno o più scenari, è opportuno procedere con un processo di normalizzazione rispetto a ulteriori unità di misura (functional area - length) che, in relazione alla destinazione del manufatto, prevedano che i valori di EC siano normalizzati rispetto a una superficie o a una lunghezza.

Si raccomanda, in particolare, l'adozione di una delle seguenti unità funzionali:

1) **Manufatti edilizi con funzione abitativa**

(residenza, uffici, scuole, ospedali, carceri):

calcolo dell'EC normalizzata sulla superficie utile lorda ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$), eventualmente suddivisa in EC riferita alla superficie utile lorda che delimita il volume climatizzato e EC riferita alla superficie che non delimita il volume climatizzato [24].

2) **Manufatti edilizi con funzione abitativa**

sottoposti a ristrutturazione: calcolo dell'EC normalizzata sulla superficie utile lorda ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$) del manufatto esistente, con l'eventuale

suddivisione nella valutazione in EC riferita alla superficie climatizzata e in EC riferita alla superficie non climatizzata, come al punto 1.

3) **Manufatti edilizi con funzione abitativa sottoposti a ristrutturazione con aumento di volumetria:**

calcolo dell'EC normalizzata sulla superficie utile lorda ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$) del manufatto esistente sommata alla superficie oggetto di estensione, con l'eventuale suddivisione nella valutazione in EC riferita alla superficie climatizzata e in EC riferita alla superficie non climatizzata, come al punto 1.

4) **Manufatti edilizi con funzioni accessorie e complementari all'abitazione**

(ad esempio pensiline, pavimentazioni esterne, coperture diverse da quelle che delimitano le unità abitative): calcolo dell'EC normalizzata sulla superficie coperta o sulla superficie occupata ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$).

5) **Manufatti edilizi con funzione strutturale:**

calcolo dell'EC normalizzata su un m^2 di deck strutturale, come ad esempio un ponte, ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$); su un km di ferrovia o di tracciato stradale ($\text{kgCO}_2\text{eq/km}$); sul numero di sedute previste, ad esempio arene e stadi ($\text{kgCO}_2\text{eq/seat}$).

L'EC di superfici e volumetrie ad uso abitativo addossate o integrate agli spazi abitativi nuovi o esistenti, e concepite con finalità di controllo della radiazione solare e della luminosità (ad esempio serre bioclimatiche, logge schermate, doppie pelli) è da contabilizzare come EC riferita alla superficie climatizzata.

Qualora una tipologia di manufatto oggetto di valutazione non fosse contemplata tra quelle appena descritte è facoltà del valutatore stabilire un'appropriata *functional area o functional length*. In particolare, se ne raccomanda l'adozione nei casi in cui vi sia la necessità di procedere alla comparazione tra scenari alternativi (ad esempio il confronto tra elementi tecnici e di impianto aventi medesima funzione ma caratterizzati da materiali e prodotti differenti).

5.7 Database per la contabilizzazione

La contabilizzazione dell'EC per i due metodi considerati (BASE e AVANZATO) richiede delle fonti appropriate.

Per il metodo BASE si raccomanda di utilizzare database che riportano informazioni generiche (*generic data*).

Per il metodo AVANZATO si raccomanda di utilizzare dati corrispondenti al materiale e prodotto selezionato in fase di progettazione esecutiva e/o in fase di realizzazione del manufatto edilizio (*specific data*). In particolare, dati messi a disposizione da produttori, o disponibili in Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) o in altre dichiarazioni.

I database di riferimento che possono essere utilizzati per la valutazione dell'EC sono suddivisibili in:

- 1) opensource;
- 2) a pagamento.

I primi (di solito previa registrazione) consentono di accedere a studi Life Cycle Assessment (LCA). Per alcuni database, le emissioni di CO₂ equivalenti sono disaggregate in funzione del ciclo di vita del manufatto edilizio, pertanto, coerenti con la suddivisione proposta dalla norma UNI EN 15978: 2011.

I secondi, prevedono il pagamento di una tariffa annuale per l'accesso e la consultazione delle informazioni.

Inoltre, i database possono ulteriormente essere suddivisi in due categorie:

- 1) database contenenti "dati finali" (relativamente facili da interpretare e utilizzare);
- 2) database contenenti "metadati" (richiedono competenze specifiche di modellazione LCA).

I metadati necessitano di una modellazione delle informazioni energetiche e ambientali tramite software LCA.

La Tabella 5.4 riporta un elenco NON esaustivo delle fonti dati (riferite al contesto Europeo) che possono essere utilizzate per la contabilizzazione dell'EC di un manufatto edilizio.

Database	Note	Link
The Inventory of Carbon and Energy (ICE)	Il database ICE contiene i dati relativi al carbonio incorporato per i materiali da costruzione. Il database comprende 200 materiali, suddivisi in 30 categorie principali di materiali, tra cui: Mattoni, Calcestruzzo, Vetro, Legno, Plastica, Metalli, Minerali e pietra, ecc. La maggior parte delle informazioni è classificabile come Generic Data.	https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html
BRE – The Green Guide	La Green Guide fa parte del BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) un sistema di valutazione ambientale accreditato per gli edifici. La Green Guide contiene più di 1500 specifiche utilizzate in vari tipi di edifici. La contabilizzazione dell'EC utilizza uno scenario di riferimento di 60 anni. La maggior parte delle informazioni è classificabile come Generic Data.	https://www.bregroup.com/greenguide/podpage.jsp?id=2126
International EPD System e EPD Italy	EPD System è il primo e principale programma EPD globale che opera in conformità alle norme ISO 14025, TS/14027, 14040, ecc. Le EPD sono conformi alle norme ISO 21930 e EN 15804. Sono disponibili Specific Data.	https://www.environdec.com/home https://www.epditaly.it
ÖKOBAUDAT – Sustainable Construction Information Portal	Il database contiene un set di dati conformi alla norma EN 15804+A1, generati sulla base dei metadati contenuti nel dataset GaBi. Sono disponibili Generic Data e Specific Data.	https://www.oekobaudat.de/no_cache/en/database/search.html
OneClick LCA	One Click LCA integra i dati di quasi tutte le piattaforme EPD disponibili nel mondo. Sono disponibili Generic Data e Specific Data.	https://www.oneclicklca.com/support/faq-and-guidance/documentation/database/
Arcadia (ENEA)	Database in fase di sviluppo (ultimo accesso ottobre 2022) nell'ambito del progetto Life Clim'Foot per calcolare la Carbon Footprint di un'Organizzazione (CFO). Si stima che saranno disponibili principalmente Generic Data.	https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html
ELCD – European Platform on Life Cycle Assessment	Piattaforma Europea che raccoglie studi Life Cycle Assessment di materiali e processi. Si tratta di metadati che richiedono di essere elaborati per procedere alla contabilizzazione dell'Embodied Carbon.	https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/
Ecoinvent	Database connesso a diversi strumenti di modellazione LCA (SimaPro, GaBi, openLCA, ecc.). Si tratta di metadati che richiedono di essere elaborati per procedere alla contabilizzazione dell'Embodied Carbon.	https://ecoinvent.org

Tabella 5.4 – Database Life Cycle Assessment per la contabilizzazione dell'Embodied Carbon di prodotti e processi.

Nell'ambito del processo di valutazione dell'EC si raccomanda sempre di citare la fonte da cui sono attinti e/o ricavati i valori. I fattori di emissione specifica che consentono di determinare l'EC, soprattutto nel caso di fabbisogni di energia elettrica, possono infatti variare anche in modo significativo da Nazione a Nazione.

Nel caso in cui il processo di valutazione sia condotto utilizzando il metodo AVANZATO è opportuno utilizzare prioritariamente le informazioni contenute nelle EPD, in altre certificazioni ambientali (es. Carbon Footprint, PEF, ecc.) o in studi LCA, verificati da enti terzi o dalla comunità scientifica.

Un ultimo aspetto che richiede di essere considerato nell'ambito del processo di contabilizzazione e valutazione dell'EC di un manufatto edilizio riguarda il periodo nel quale è stato condotto lo studio (prevalentemente LCA) che ha portato all'elaborazione di una EPD o di un valore di EC disponibile su una banca dati. In linea di massima, si raccomanda di utilizzare informazioni che siano temporalmente valide (nel caso di una EPD a un materiale o prodotto è associato un periodo di validità della dichiarazione) e che non siano state elaborate in un periodo antecedente a 7 anni dalla valutazione dell'EC o della Whole Life Carbon. Qualora, ad esempio, lo studio sia previsto nell'anno 2023, saranno considerati validi i dati elaborati a partire dal 2016.

Parte seconda – Embodied Carbon: guida alla valutazione

La metodologia di contabilizzazione e di valutazione dell'*Embodied Carbon*, e di conseguenza della *Whole Life Carbon*, o della *Circular Economy*, di un manufatto edilizio è descritta nei successivi paragrafi.

L'organizzazione si riferisce alle fasi (*modules*) proposte dalla UNI EN 15978:2011 così come riassunti nella Tabella 6.1.

Ambiti della valutazione	Fasi del ciclo di vita	Informazioni oggetto di studio
	Tutte le fasi	Quantità dei materiali e dei prodotti (determinate su fonti: Bill-of-Quantities o Design-as-Built)
Ambito minimo di applicazione	A1-A3 Produzione	Fattori di emissione specifica ricavati da banche dati, metadati e/o EPD o altra certificazione
Whole Life Cycle Carbon	A1-A3 Produzione	Fattori di emissione specifica ricavati da banche dati, metadati e/o EPD o altra certificazione
	A4 Trasporto al cantiere	Emissioni derivanti da distanza, capacità di carico e tipologia del mezzo di trasporto dei materiali e dei prodotti conferiti al sito di costruzione
	A5 Costruzione	Emissioni derivanti da mezzi e attrezzature di cantiere, così come da rifiuti prodotti dalle operazioni di costruzione e demolizione preliminare
	B1 Uso	Assorbimento di carbonio da parte dei prodotti a base cemento (carbon uptake), compensazione delle emissioni tramite misure di carbon off-setting ed emissioni associate al funzionamento degli impianti nello scenario temporale di riferimento
	B2-B3 Manutenzione e Riparazione	Fabbisogni elettrici non compresi nella fase B6 (Operational Carbon)
	B4 Sostituzione	Emissioni associate alla sostituzione di materiali e prodotti rispetto allo scenario temporale di riferimento
	B5 Ristrutturazione	Emissioni e compensazioni associate alle fasi A1- A5 dei nuovi materiali e prodotti; emissioni derivanti dalle fasi C2- C4 dei rifiuti prodotti nelle attività di demolizione; emissioni relative alle fasi C2-C4 dei rifiuti generati a valle delle operazioni di costruzione
	C1 – Decostruzione e Demolizione	Emissioni derivanti da mezzi e attrezzature di cantiere, così come da rifiuti prodotti dalle operazioni di demolizione
	C2- Trasporto	Emissioni derivanti da distanza, capacità di carico e tipologia del mezzo di trasporto dei materiali e dei prodotti conferiti al sito di trattamento dei rifiuti
	C3 – Trattamento dei rifiuti	Emissioni derivanti da operazioni di trattamento dei rifiuti prodotti dalle operazioni di: costruzione, demolizione, manutenzione, riparazione e sostituzione; tali operazioni possono prevedere processi di riciclo, recupero, o trattamenti pre-discarica
	C4 – Dismissione	Fattori di emissione specifica dei rifiuti destinati alla discarica
Circular Economy	D	Benefici e/o impatti derivanti da operazioni di riciclo, recupero e riuso dei materiali

Tabella 6.1 – Sintesi degli ambiti del processo di contabilizzazione dell'EC, delle corrispondenti fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio e indicazione della tipologia di informazioni che ciascuna fase richiede venga raccolta ed elaborata.

La Tabella 6.1 non comprende le fasi B6 e B7 poiché sono oggetto di procedure e metodi di analisi e valutazione differenti rispetto a quelle contenute nel presente report. Ciascuna delle fasi elencate in tabella è stata oggetto di studio attraverso di diverse fonti bibliografiche, sitografiche e normative che hanno portato all'elaborazione dei successivi capitoli e paragrafi. Completano i paragrafi alcuni BOX di approfondimento concepiti per affrontare alcuni temi specifici, spesso applicabili a più fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio.

Il calcolo dell'EC è da ricondurre agli elementi tecnici, di cui alla Tabella 5.2. Si raccomanda di redigerne una ad hoc per il manufatto oggetto di studio, nella quale si definiscono gli elementi tecnici assunti per il calcolo. La determinazione dei valori di EC dei materiali e dei prodotti avviene utilizzando una o più banche dati (si veda Tabella 5.4) che è necessario siano opportunamente citate, indicando anche a quale periodo temporale fanno riferimento. Nel caso, poi, in cui in progetto si preveda l'impiego di alcuni materiali riciclati si rimanda al BOX 1, mentre se si intendono impiegare prodotti in legno o a base legno si rimanda al BOX 2.

Si ricorda, inoltre, che ai fini di una comparazione con l'*Operational Carbon* la valutazione dell'EC può prevedere una suddivisione tra superfici/volumi che delimitano gli spazi climatizzati (riscaldamento e raffrescamento) e superfici/volumi che non delimitano spazi climatizzati.

In relazione all'unità funzionale assunta come riferimento, la contabilizzazione delle emissioni di CO₂ equivalente può riferirsi:

- 1) al valore di EC (tCO₂eq; kgCO₂eq) calcolato all'anno 0 del ciclo di vita dell'edificio;
- 2) al valore di EC (kgCO₂eq/m²) calcolato all'anno 0 e normalizzato sul m² di superficie lorda di pavimento del manufatto edilizio;
- 3) al valore di EC (kgCO₂eq/m² anno) normalizzato rispetto allo scenario temporale di riferimento del manufatto edilizio e rispetto al m² di superficie lorda di pavimento.

La valutazione può essere condotta:

- sulla quantità di prodotti/materiali che si intendono acquistare o che sono stati acquistati (*Bill-of-Quantities*);
- sulla base di informazioni di natura progettuale – *Design-as-Built* – (ad esempio elaborati scritto grafici che illustrano i materiali e i prodotti che costituiscono gli elementi tecnici).

La selezione dei prodotti/materiali – riferita agli elementi tecnici di cui alla Tabella 5.2 – deve essere la più completa possibile e comunque comprendere **non meno** di 5 (o 7) elementi tecnici tra quelli raccomandati. Il criterio con il quale selezionare gli elementi tecnici è da ricondurre all'incidenza percentuale delle quantità in termini di: superficie complessiva (m²), peso (kg) e volume (m³). Per approfondimenti si rimanda al paragrafo 5.3 e alla successiva nota metodologica.

Nota metodologica

Al fine di una corretta selezione dei materiali da includere nel calcolo dell'EC, si riporta nella Tabella 6.2 l'esempio di una parete perimetrale verticale.

Materiale e/o prodotto	Densità (kg/m ³)	Spessore (m)	Peso (kg/m ²)	Percentuale (%)	Incluso/escluso
Pannello di rivestimento	1350	0,008	10,8	12,79	Incluso
Staffe di ancoraggio in acciaio	7800	0,001	1,56	1,84	Escluso

Componente	Densità (kg/m³)	Spessore (m)	Peso (kg/m²)	Percentuale (%)	Incluso/escluso
Staffe di ancoraggio in acciaio zincato	7800	0,003	14,93	17,68	Incluso
Lana di roccia	70	0,08	5,6	6,63	Incluso
Lana di roccia	70	0,12	8,4	9,97	Incluso
Lana di vetro	40	0,1	4	4,73	Incluso ^A
Lastra cartongesso	750	0,0125	37,5	44,41	Incluso
Finitura con vernice e stucco	1650	0,001	1,65	1,95	Escluso

^A Sebbene non raggiunga la percentuale del 5% (vedi paragrafo 5.3), si raccomanda di inserire nella contabilizzazione dell'EC tutti gli isolanti, o comunque i materiali o prodotti principali che costituiscono l'elemento tecnico.

Tabella 6.2 – Bilancio di massa di una parete perimetrale verticale e criteri di selezione dei materiali per la valutazione dell'EC.

Nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione e/o riqualificazione la valutazione riguarda i materiali e i prodotti destinati a sostituire o integrare quelli esistenti. Infine, non è necessario invece procedere alla valutazione dell'EC degli elementi tecnici che costituiscono il manufatto edilizio originario. I materiali e i prodotti del manufatto edilizi che verranno rimossi dovrebbero essere quantificati in peso (kg) e/o volume (m³), considerati come rifiuti (speciali) connessi ad attività di demolizione e valutati secondo uno scenario end-of-life (C1-C4).

Produzione (A1-A3)

6.1 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di produzione (A1- A3)

La fase di produzione raggruppa tre sotto fasi previste nello standard UNI EN 15978:

- estrazione delle risorse (energetiche e materie prime) – A1;
- trasporto – A2;
- trasformazione in prodotti finiti e semilavorati destinati a essere conferiti al sito di costruzione del manufatto edilizio – A3.

La contabilizzazione dell'EC relativa alla fase di

produzione A1-A3 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO.

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto e da EPD.

6.1.1 Produzione: Metodo BASE

Nel metodo BASE la valutazione dell'EC dei sistemi di produzione (A1-A3) dei materiali e dei prodotti che si prevede di impiegare nella realizzazione del manufatto edilizio avviene secondo 2 step sequenziali e secondo due modalità – *Bill-of-Quantities* o *Design-as-Built*.

Calcolo dell'EC con dati Bill-of-quantities

Step 1) Identificazione e quantificazione dei materiali e dei prodotti

Nel caso la valutazione consideri le quantità che si intendono acquistare, si presume che le stesse quantità siano conferite al cantiere, cui corrisponderà una certa produzione di rifiuti, derivante dalle attività di costruzione (Figura 6.1).

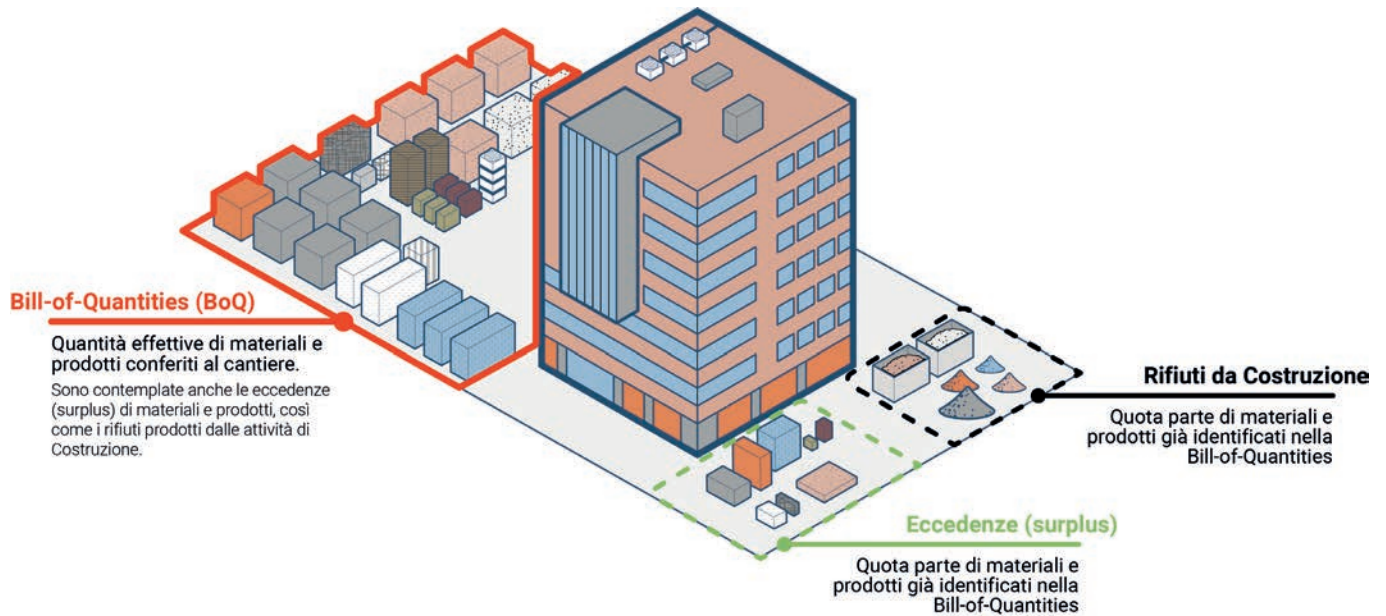


Figura 6.1 – determinazione dei materiali e dei prodotti sulla base delle quantità che si intendono acquisire e conferire in cantiere (elaborazione degli autori).

Step 2) Valutazione dell'Embodied Carbon di Produzione: EC_{A1-A3}

Il calcolo dell'Embodied Carbon $_{A1-A3}$ [kgCO₂eq] di Produzione, ovvero di materiali e dei prodotti avviene secondo la formula [1]:

$$[1] EC_{A1-A3} = \sum_{j=1}^n Mat_j * EC_{A1-A3-j} [kgCO_2eq]$$

dove:

EC_{A1-A3} = Somma dell'Embodied Carbon degli j-esimi materiali che costituiscono il manufatto edilizio

Mat_j = Quantità dello j-esimo materiale o prodotto che costituisce il manufatto edilizio (kg)

$EC_{A1-A3-j}$ = Embodied Carbon dello j-esimo materiale o prodotto che costituisce il manufatto edilizio (kgCO₂eq/kg)

Calcolo dell'EC con dati design as built

Step 1) Identificazione e quantificazione dei materiali e dei prodotti

Nel caso la valutazione consideri le quantità di materiali e prodotti sulla base di elaborati grafici che illustrano come sarà effettivamente costruito il manufatto edilizio (Figura 6.2), la loro quantificazione richiede l'adozione di un fattore [f_{Pro}], denominato: fattore correttivo di produzione. Tale fattore stima le quantità potenzialmente consegnate al cantiere di costruzione e, come conseguenza, i potenziali rifiuti da costruzione che il cantiere genererà (per la determinazione dell'EC delle attività di cantiere si veda il paragrafo 7.2).

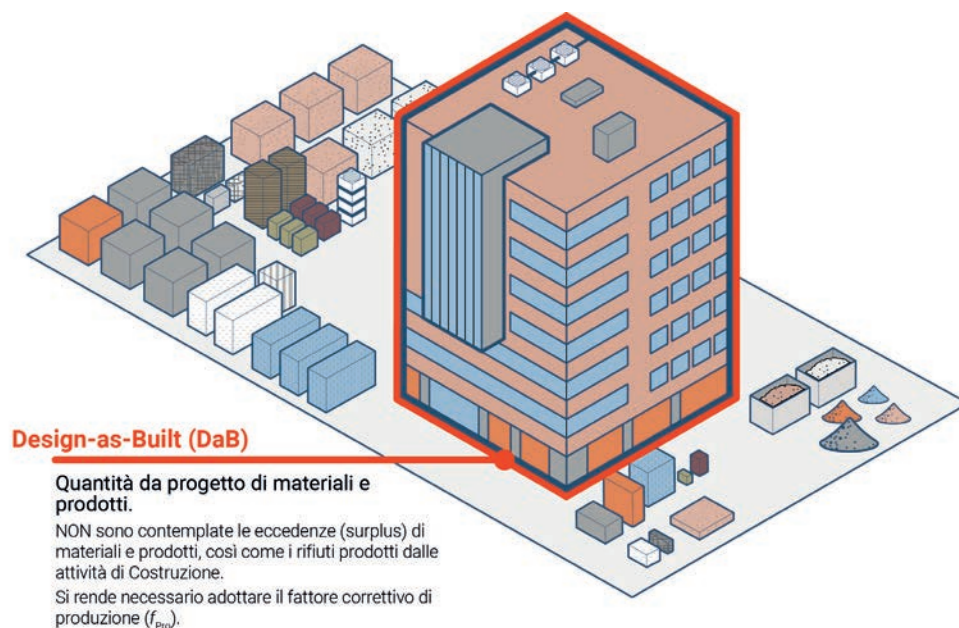


Figura 6.2 – Determinazione dei materiali e dei prodotti sulla base delle quantità previste in progetto (elaborazione degli autori).

La determinazione delle quantità di materiali e prodotti avviene come segue [2]:

$$[2] \quad \text{Mat}_j = \text{Mat}_{j\text{-DaB}} + (\text{Mat}_{j\text{-DaB}} * f_{A1-A3})$$

[kg]

dove:

Mat_j = stima del j-esimo materiale o prodotto consegnato al cantiere (kg)

$\text{Mat}_{j\text{-DaB}}$ = j-esimo materiale o prodotto previsto in progetto – *Design-as-Built* (kg)

f_{A1-A3} = fattore correttivo di produzione basato sulla percentuale dello j-esimo materiale o prodotto previsto nel progetto (%)

Il fattore correttivo di produzione è un valore percentuale che varia da materiale a materiale. La Tabella 6.3 riassume dei valori desunti dallo studio di alcuni articoli scientifici, finalizzati a quantificare in fase di progettazione la percentuale di scarti generati in fase di cantiere. Si noti che il fattore correttivo può essere formulato fino a un valore massimo percentuale, sono altresì ammessi valori inferiori giustificati da condizioni specifiche di progetto e/o di cantiere.

STRUMENTI PER LA DECARBONIZZAZIONE:
contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio

Tipologia di materiale o prodotto	Fattore correttivo di produzione [f_{Pro}]	Fonte
Cartongesso	Fino a un max 22%	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018.</p> <p>2) Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective; Chakkrit Luangcharoenrat, Singh Intrachooto, Vachara Peansupap and Wandee Sutthinarakorn; Thailand, 2019.</p> <p>3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.</p>
Isolanti (acustici, termici) Guaine, barriere e impermeabilizzanti	Fino a un max 9%	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018.</p>
Mattoni e blocchi	Fino a un max 9% (Fonte 3 riporta un valore max del 20%)	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018.</p> <p>2) Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective; Chakkrit Luangcharoenrat, Singh Intrachooto, Vachara Peansupap and Wandee Sutthinarakorn; Thailand, 2019.</p> <p>3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.</p>
Legname portate o strutturale (es blocchi, montanti-traversi, colonne)	Fino a un max 9%	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018.</p> <p>2) Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective; Chakkrit Luangcharoenrat, Singh Intrachooto, Vachara Peansupap and Wandee Sutthinarakorn; Thailand, 2019.</p> <p>3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.</p>
Legname non strutturali (es. legno armature, OSB, rivestimento, ecc.)	Fino a un max 15%	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018.</p> <p>2) Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective; Chakkrit Luangcharoenrat, Singh Intrachooto, Vachara Peansupap and Wandee Sutthinarakorn; Thailand, 2019.</p> <p>3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.</p>
Materiali plastici Prodotti vernicianti e trattamenti superficiali	Fino a un max 5%	<p>1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste.</p>

Tipologia di materiale o prodotto	Fattore correttivo di produzione [f_{Pro}]	Fonte
Calcestruzzo	Fino a un max 4%	1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste Generation; Wolverhampton, UK, 2018. 2) Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective; Chakkrit Luangcharoenrat, Singh Intrachooto, Vachara Peansupap and Wandee Sutthinarakorn; Thailand, 2019. 3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022. 4) Construction waste: quantification and source evaluation; Olanda, 1996. 5) Construction Waste Reduction through Application of Different Structural Systems for the slab in a Commercial Building: A South Korean Case; South Korea, 2021.
Vetro	Fino a un max 4%	1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste. 3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.
Metalli ferrosi e non ferrosi	Fino a un max 3%	1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste. 3) How to calculate Embodied Carbon: The Institution of Structural Engineer, UK, 2022.
Condotti e tubazioni in acciaio (es. HVAC)	Fino a un max 8%	1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste.
Condotti e tubazioni in materiale plastico (es. cavi elettrici, tubazioni scarico)	Fino a un max 5%	1) Achieving Sustainability in the UK Construction by Reducing Waste.

Tabella 6.3 – Determinazione del valore massimo del fattore correttivo di produzione (f_{A1-A3}) per alcune categorie di materiali e prodotti.

Se in fase di progettazione preliminare non fosse possibile procedere a una quantificazione del fattore correttivo di produzione per alcune categorie merceologiche o per alcune tipologie di materiali e prodotti, si raccomanda di assumere un valore medio pari all'8-9%.

Step 2) **Valutazione dell'Embodied Carbon di Produzione: ECA1-A3**

Una volta stimata la quantità dello j-esimo materiale o prodotto consegnato al cantiere (Mat_j), il calcolo dell'ECA1-A3 [kgCO₂eq] di materiali e dei prodotti avviene secondo la formula (1).

6.1.2 Produzione: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO prevede il coinvolgimento dell'impresa appaltatrice (o esecutrice), dei produttori delle quantità di materiali e prodotti, eventualmente dei fornitori, nonché un elevato livello di elaborazione dei dati disponibili. Più precisamente, a fronte della disponibilità di un computo metrico estimativo o di altra documentazione tecnica – in cui si evidenziano con precisione le quantità di materiali e di prodotti che saranno utilizzati nel manufatto edilizio – è possibile caratterizzare la fase di produzione (A1-A3).

Se i materiali e i prodotti selezionati per la realizzazione del manufatto, dispongono di un EPD,

o altra certificazione, verranno utilizzati i valori di EC corrispondenti. In assenza di una certificazione valida i valori di EC potranno essere ricavati da schede tecniche di prodotto, da informazioni rese disponibili dagli attori del processo edilizio (produttori, costruttori, ecc.) e da altre fonti tecniche e scientifiche.

Sebbene connotato da un livello superiore di dettaglio, il metodo AVANZATO non prevede una diversa modalità di contabilizzazione e di valutazione rispetto al metodo BASE. Pertanto, il calcolo dell'EC associata alle attività di Produzione (EC_{A1-A3}) prevede di impiegare gli stessi 2 step descritti nel paragrafo 6.1.1.

BOX 1: Valutazione dell'Embodied Carbon di materiali e prodotti riciclati: $EC_{A1-A3-rc}$

L'EC di materiali e prodotti che contengono materie prime seconde (MPS) o sottoprodotti, ovvero *Embodied Carbon of products with Recycled content* ($EC_{A1-A3-rc}$ - kgCO₂eq) può essere determinato in conformità ad alcune definizioni e metodi di calcolo contenuti all'interno di standard e report tecnici. Per la definizione di materiale e prodotto riciclato si rimanda al glossario presente al paragrafo 4.1.

La Figura B1 illustra il caso di un prodotto la cui percentuale di materia prima seconda impiegata nel processo è pari al 40% del prodotto (Prodotto 2). La determinazione dell'EC avviene utilizzando il **metodo recycled content, così come definito e proposto nella PAS 2050-2008: (Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services)**.

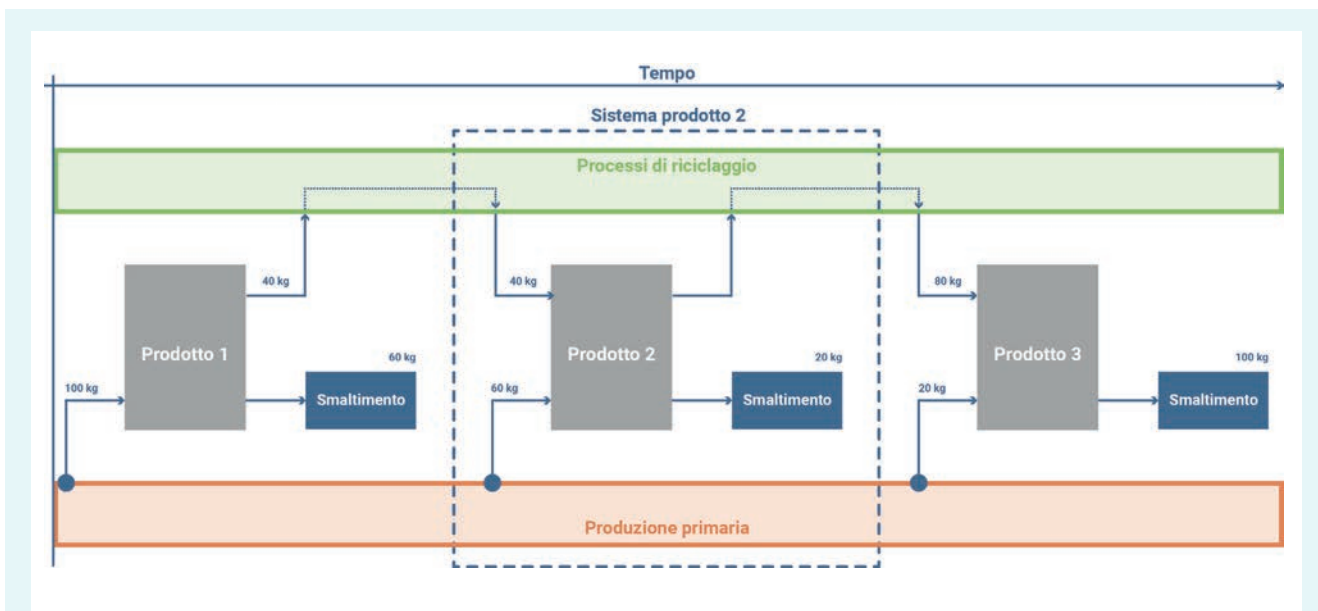


Figura B1 – Composizione di prodotto (Prodotto 2) ottenuto da 60 kg di materia prima e da 40 kg di materia prima seconda (elaborazione degli autori).

Il contenuto di riciclato nel metodo BASE può essere determinato sia nel calcolo *Bill-of-Quantities* sia nel calcolo *Design-as-Built*. La determinazione dell'*Embodied Carbon of products with Recycled content* avviene utilizzando la formula (3), mutuata dalla PAS 2050 – 2008:

$$[3] \quad EC_{A1-A3} \text{Mat}_{Jrc} = \sum_{j=1}^n (1 - R_j) * EC_{Pro-j} + (R_j * EC_{Rec-j}) \quad [\text{kg CO}_2 \text{eq}]$$

dove:

$EC_{A1-A3} \text{Mat}_{Jrc}$ = Embodied Carbon del j-esimo materiale e prodotto riciclato [kgCO₂eq]

R_j = contenuto di riciclato del j-esimo materiale e prodotto [%]

E_{Pro-j} = Embodied carbon dovuta all'impiego della materia prima nel processo di produzione dello j-esimo materiale e prodotto [kgCO₂eq]

E_{Rec-j} = Embodied carbon dovuta all'impiego della materia prima seconda nel processo di produzione dello j-esimo materiale e prodotto determinata considerando i processi di trasformazione del rifiuto in una materia prima seconda [kgCO₂eq]

La formula (3) può essere adottata per alcune tipologie di materiali e prodotti, in particolare: metalli ferrosi e non ferrosi, leghe e materiali plastici.

Nel caso del calcestruzzo la formula può essere applicata due volte. La prima volta l'*EC of products with recycled content* può essere calcolata se il cemento contiene scorie d'alto forno o ceneri volanti provenienti dal ciclo produttivo di centrali elettriche o impianti siderurgici. La seconda volta se si prevede l'impiego di inerti riciclati in sostituzione di aggregati naturali.

BOX 2: Carbon Sequestration dei prodotti in legno o a base legno – Produzione: CS_{A1-A3}

Con riferimento alla fase di produzione (A1-A3), la realizzazione di un manufatto edilizio può prevedere l'impiego di materiali e prodotti in legno, o a base legno. Per questa tipologia di elementi è necessario procedere alla contabilizzazione della *Carbon Sequestration* (CS_{A1-A3}), ovvero l'assorbimento di anidride carbonica che si verifica durante la fase vegetativa di una pianta, attraverso il processo di fotosintesi.

Il carbonio stoccato – derivante dalle operazioni di trasformazione della specie arborea in un prodotto da costruzione – è altresì conosciuto come “carbonio biogenico” e, in linea con l'iter procedurale proposto nella norma UNI EN 15804:2019, deve essere contabilizzato separatamente dal carbonio fossile. Al fine di semplificare la comprensione, si riporta la figura B2, che illustra il ciclo di vita del carbonio biogenico (trasferimento ed emissioni) e del carbonio fossile (emissioni) di un generico prodotto in legno o a base legno.

La contrapposizione tra emissioni di origine fossile e carbonio biogenico è evidente. La componente biogenica rispetto a un orizzonte temporale, definito dalle fasi A1-A5, B1-B7 e C1-C4, costituisce un credito che si mantiene costante.

Una volta che il prodotto a base legno avrà esaurito il suo ciclo di vita utile, potrà:

- mantenere il credito invariato, nel caso sia riutilizzato tal quale;
- diminuire il credito, pur rimanendo negativo, nel caso sia sottoposto a processi di trattamento e di riciclaggio;
- azzerare il credito, nel caso sia avviato a incenerimento;
- azzerare il credito ed emettere delle emissioni di CO_2 equivalente, nel caso il rifiuto sia conferito in discarica e sottoposto a digestione anaerobica.

Per informazioni specifiche inerenti le differenti modalità di trattamento dei rifiuti in legno (o a base legno) si rimanda al BOX 5.

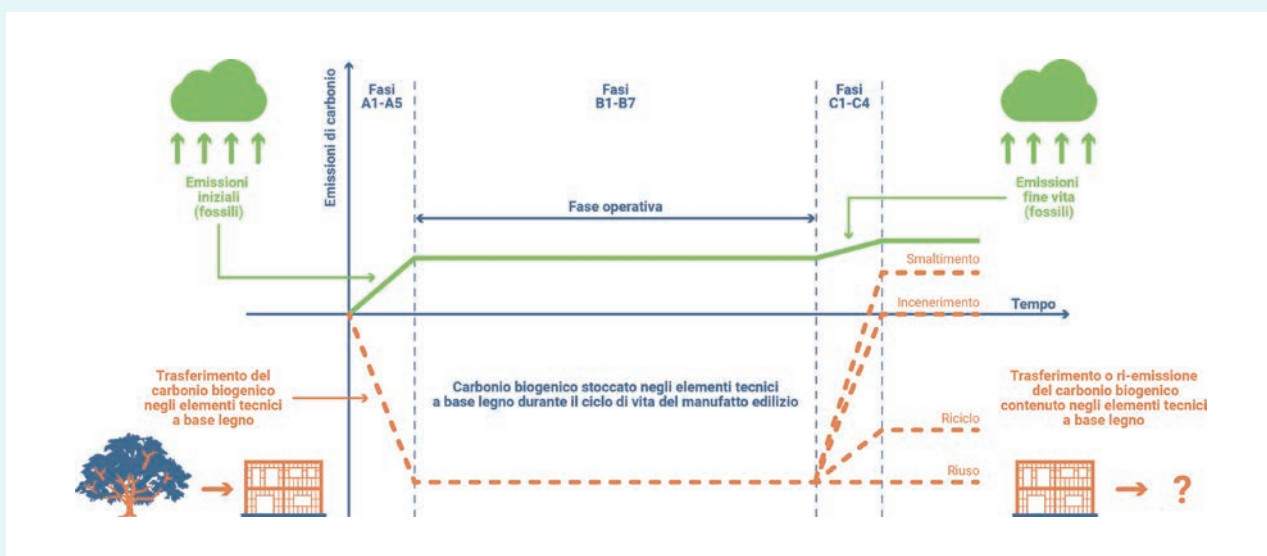


Figura B2 – Andamento del carbonio biogenico e del carbonio fossile di un generico prodotto a base legno (elaborazione degli autori su fonte HTCEC [25]).

La stima della CS_{A1-A3} , relativa alla fase di produzione (4) è ricavata dalla norma UNI EN 16449:2014: Legno e prodotti a base legno – Calcolo del contenuto di carbonio di origine non fossile del legno e conversione in anidride carbonica:

$$[4] \quad CS_{A1-A3} = \frac{44}{12} * cf * \frac{1}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kg di prodotto}} \right]$$

dove:

- CS_{A1-A3} = carbonio sequestrato dall'atmosfera per chilogrammo di prodotto
- cf = frazione di carbonio presente nella biomassa legnosa, considerando il prodotto secco
- ω = contenuto di umidità (%)
- 44 = peso atomico della Anidride Carbonica (CO_2)
- 12 = peso atomico del Carbonio (C)

La norma, in assenza di informazioni specifiche sul prodotto, suggerisce di assumere un valore di 0,5 per cf e un valore di 12% per ω .

Nel caso di valutazione con metodo BASE, è possibile impiegare un valore (generico) pari a – 1,64 $kgCO_2eq/kg$, così come indicato dal RICS [9]. Mentre, per le valutazioni secondo il metodo AVANZATO, si suggerisce di raccogliere informazioni precise sul prodotto in legno o a base legno, al fine di determinare una CS_{A1-A3} specifica.

Nota metodologica

Per la corretta computazione del carbonio biogenico dei prodotti in legno o a base legno, risulta opportuno segnalare che: qualora si adotti un materiale o prodotto munito di certificazione EPD – pubblicata in seguito al recepimento della norma UNI EN 15804:2019 – non sarà necessario adottare la procedura descritta, poiché i contributi derivanti dal carbonio fossile (emissioni) e dal carbonio biogenico sono riportati separatamente.

Nel caso, invece, si adottino materiali o prodotti corredati da certificazione EPD, antecedente all'entrata in vigore della norma citata, il contributo derivante dal carbonio biogenico è contabilizzato all'interno della categoria d'impatto GWP. Sarà pertanto necessario adottare la formula (4) per valutare il quantitativo di carbonio biogenico e, in seguito, sottrarre il valore così ottenuto al GWP delle fasi A1-A3 presenti sul documento EPD.

7 Costruzione (A4 – A5)

La fase di costruzione raggruppa due sottofasi previste nello standard UNI EN 15978:

- trasporto al cantiere – A4;
- costruzione (del manufatto edilizio) – A5.

7.1 Determinazione dell'Embodied Carbon della fase di Trasporto al cantiere (A4)

Questa fase è finalizzata a determinare l'EC relativa alle operazioni di Trasporto al cantiere, intese come attività caratterizzanti lo spostamento di materiali e prodotti verso il sito di costruzione del manufatto edilizio, considerando anche le eventuali soste intermedie in depositi di stoccaggio e/o in centri di distribuzione.

Anche per la contabilizzazione dell' EC_{A4} relativa ai Trasporti al cantiere, ci si avvale di un metodo BASE e AVANZATO.

In particolare, i due approcci sono così contraddistinti:

- il metodo BASE, associato alla fase di progettazione preliminare, necessita di informazioni generiche sulla distanza del viaggio e sulla tipologia di mezzo impiegato;
- il metodo AVANZATO, applicabile nella fase di progettazione esecutiva o di costruzione e caratterizzato da una contabilizzazione precisa delle emissioni, necessita di dati specifici inerenti alla rete di distribuzione dei materiali e prodotti, come anche di informazioni dettagliate sulle tipologie e caratteristiche dei mezzi adibiti al trasporto.

Per entrambi i metodi, la procedura di calcolo per contabilizzazione le emissioni di CO_2eq , associate ai Trasporti al cantiere, si avvale di una metodologia standardizzata; descritta all'interno della norma UNI

EN 16258:2013: *Metodologia per il calcolo e la dichiarazione del consumo di energia e di emissioni di gas ad effetto serra (GHG) dei servizi di trasporto (merci e passeggeri).*

Al fine di facilitare la comprensione della norma, come anche l'elaborazione delle informazioni e dei dati, è stato utilizzato il report della *European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (CLECAT)*, che mette a disposizione esempi pratici di elaborazione dei dati, e alcune tabelle che saranno utilizzate nei paragrafi successivi [26].

Nota: la procedura di seguito illustrata, per determinare l' EC_{A4} dei processi di *Trasporto al cantiere*, è anche applicabile alle operazioni di *Trasporto a fine vita* (EC_{C2}), che si verificano nella fase C (fine vita) del manufatto edilizio si veda paragrafo 9.2 "*Determinazione dell'EC del processo di Trasporto a fine vita (C2)*".

7.1.1 Trasporti: Metodo BASE

Il metodo BASE è utile nell'elaborazione di una stima iniziale delle emissioni ma anche nella valutazione di scenari alternativi di progetto. In tal senso, in accordo con le linee guida proposte da RICS [9], la metodologia di calcolo prevede l'adozione di distanze generiche per le operazioni di trasporto.

La procedura di calcolo è applicabile a tutti i processi di Trasporto, sia per EC_{A4} sia per EC_{C2} . Tuttavia si precisa che, ai fini del lavoro di contabilizzazione e di valutazione, i valori devono essere trattati separatamente. Solo in una fase successiva, i valori ottenuti saranno sommati (insieme a quelli derivanti dalle altre fasi del ciclo di vita del manufatto) per ottenere il bilancio complessivo di CO_2eq – Whole Life Carbon – del manufatto preso in esame.

La procedura prevede 7 step sequenziali di calcolo dell' EC_{A4} dei trasporti.

Step 1_ Identificazione della tipologia di trasporto.

La prima operazione prevede che vengano identificati i mezzi adibiti al trasporto. In conformità alle indicazioni presenti nella norma UNI EN 16258:2013, è possibile evidenziare tre categorie di trasporto: gomma, rotaia e via mare.

La Tabella 7.1, sempre in analogia con le informazioni riportate nella UNI EN 16258:2013, consente di selezionare differenti tipologie di mezzi e, al tempo stesso, definire la tipologia di carburante impiegato per il suo funzionamento e la sua unità di misura.

Tipologia di mezzi	Scenario temporale di riferimento	Fonte
Autocarro < 7,5 tonnellate	Diesel	l/tkm
Autocarro 7,5-12 tonnellate	Diesel	l/tkm
Autocarro 12-24 tonnellate	Diesel	l/tkm
Autocarro 24-40 tonnellate	Diesel	l/tkm
Treno E.	Elettricità	kWh/tkm
Treno D.	Diesel	l/tkm
Nave container	HFO (Olio combustibile pesante)	kg/tkm

Tabella 7.1 – Tipologia di mezzi secondo UNI EN 16258:2013.

Successivamente, sulla base della tipologia di mezzo selezionata, è necessario comprendere la sua portata; ovvero il massimo carico trasportabile dal veicolo entro i limiti fissati dalla carta di circolazione dello stesso. In tal senso, sarà necessario calcolare la quantità di materiale da trasportare e verificare che non ecceda i limiti imposti.

I valori massimi ammessi per ogni Stato dell'Unione Europea sono illustrati da Confetra (Confederazione Generale Italia dei Trasporti e della Logistica) [27]. In linea con i valori definiti da Confetra, per verificare il carico massimo trasportabile, in relazione alla portata del mezzo di trasporto, si rimanda alla Tabella 7.3. La tabella propone nella prima colonna la portata del mezzo, mentre nella sesta colonna identifica il carico utile massimo trasportabile (espresso in tonnellate).

Step 2_ Calcolo del numero di viaggi per trasportare il materiale.

Questa sezione del metodo di calcolo è da effettuare, esclusivamente, nel caso in cui il mezzo selezionato per il trasporto non sia in grado di trasferire il quantitativo totale di materiale in un singolo “viaggio”. Si rende pertanto necessario suddividere il quantitativo da trasportare in più viaggi, secondo la seguente formula (5):

$$[5] \quad n^{\circ} \text{viaggi totali} = \frac{\text{totale tonnellate da trasportare [t]}}{\text{totale tonnellate trasportabili a viaggio dal mezzo [t]}} \quad [n^{\circ}]$$

Si segnala che il totale delle tonnellate trasportabili a viaggio dal mezzo può essere desunto dalla colonna 6 della Tabella 7.3 del presente report. In particolare, questo step si applica prevalentemente a modalità di trasporto su gomma, poiché per grandi quantitativi da trasportare sono richiesti più viaggi; mentre per i trasporti su rotaia e via mare è plausibile immaginare che una sola tratta sia in grado di trasferire tutto il materiale richiesto per il manufatto edilizio.

Si precisa inoltre che il numero di viaggi totali, ottenuto tramite la formula 5, sarà da moltiplicare per il risultato ottenuto nello step 6 (formula n°6).

Step 3_ Determinazione della distanza

In linea con le indicazioni presenti nel documento RICS [9] questa sezione è finalizzata a stabilire le distanze (esprese in km) da utilizzare nella contabilizzazione dell'EC_{A4}, sulla base di una serie di scenari di trasporto.

Le informazioni relative alle distanze stimate di trasporto sono riportate nella Tabella 7.2. La tabella è suddivisa in tre colonne. La prima definisce i differenti scenari di trasporto (locale, nazionale, europeo e globale). La seconda e la terza identificano le distanze medie da associare alla tipologia di produzione (A1-A3). In sintesi, è necessario stabilire se la produzione di un determinato materiale o prodotto, utilizzato nel manufatto edilizio in esame, avviene in ambito: locale, nazionale, europeo o globale.

Scenario di trasporto	km (strada)	km (mare)
Produzione locale (es. cemento, laterizi, ecc.)	50	0
Produzione nazionale (es. cartongesso, isolante, ecc.)	300	0
Produzione europea (es. moduli di facciata, legnami, ecc.)	1.500	0
Produzione globale (es. materiali e prodotti speciali)	200	10.000

Tabella 7.2 – Scenari di trasporto da impiegare per il calcolo.

Step 4_ Identificazione delle caratteristiche del viaggio (solo per trasporti su gomma)

La quarta parte della procedura di calcolo si riferisce alle caratteristiche del viaggio su gomma, pertanto, non si applica ai viaggi su rotaia o via mare.

Come stabilito dalla norma EN 16258:2013, la procedura richiede inizialmente di identificare due parametri: A) e B); cui corrispondono caratteristiche prevalenti di trasporto (prevalentemente pianeggiate o collinare).

Per i trasporti su gomma i parametri A) e B) sono indispensabili per la procedura di calcolo del consumo specifico del mezzo (si veda lo step 5).

Più precisamente, il parametro A contabilizza il consumo di carburante (espresso in litri/100km) a mezzo vuoto. Il parametro B esprime la differenza tra il veicolo a pieno carico e il veicolo vuoto, sempre espresso in litri/100km.

Ai due parametri appena descritti se ne aggiunge un terzo: C; che quantifica il carico utile massimo espresso in tonnellate.

La Tabella 7.3, sempre in conformità alle indicazioni della norma UNI EN 16258:2013, stabilisce i valori di A), B) e C), associati a differenti tipologie di mezzi. La tabella propone due possibili caratteristiche del

viaggio: strada pianeggiante o strada collinare, cui corrispondono altrettanti valori per i parametri A) e B), a seconda della tipologia di mezzo su gomma impiegato.

Tipologia di mezzo	Collinare km		Pianeggiante		C
	A	B	A	B	
	l/100km	l/100km	l/100km	l/100km	t
Autocarro < 7,5t	13,0	1,4	12,9	1,2	3,5
Autocarro 7,5-12t	16,9	3,2	16,6	2,4	6,0
Autocarro 12-24t	19,3	4,2	18,7	2,9	12,0
Autocarro 24-40t	22,7	14,4	21,5	8,2	26,0

Tabella 7.3 – Parametri A, B e C in relazione al tipo di mezzo utilizzato e alle caratteristiche del viaggio.

È necessario precisare che i parametri A), B) e C) sono univoci per tutte le categorie di mezzo, siano essi Euro 3 o superiori, poiché i consumi di carburante sono considerati pressoché identici o con delle variazioni trascurabili.

Step 5_Calcolo del consumo specifico.

Questa parte della procedura di calcolo prevede di determinare il valore del consumo specifico E) dei mezzi su gomma. Il calcolo del parametro E) deve essere effettuato mediante la formula 6:

$$[6] \quad E = A \left[\frac{l}{100km} \right] + B \left[\frac{l}{100km} \right] * \frac{N[t]}{C[t]} \quad \left[\frac{l}{100km} \right]$$

dove:

E = consumo specifico del mezzo su gomma

A = consumo di carburante del mezzo vuoto (vedi Step 4)

B = differenza tra il veicolo a pieno carico e il veicolo vuoto (vedi Step 4)

N = carico trasportato (vedi Step 1)

C = carico utile massimo del mezzo (portata) (vedi Step 4)

Per le tipologie di trasporto su rotaia o via mare, la UNI EN 16258:2013 – in considerazione della difficoltà nello stimare i carichi trasportati – propone dei valori tabellari da assumere nella contabilizzazione del consumo specifico. Tuttavia, prima di procedere alla selezione di tale valore, è indispensabile definire in che condizione è trasportato il materiale o il prodotto. In altre parole, è necessario definire in che modalità è stoccato all'interno del mezzo. Si configurano di conseguenza tre possibili scenari:

- 1) materiali e prodotti impilati leggeri (es. pannelli isolanti);
- 2) materiali e prodotti impilati medi/pesanti (es. sacchi cemento, laterizi, pannelli di rivestimento, ecc.);
- 3) materiali sfusi (es. inerti, sabbia, ecc.).

Le successive tabelle definiscono i valori del consumo specifico E, in relazione a differenti tipologie di mezzi

e modalità di stoccaggio delle merci. In particolare, la Tabella 7.4 illustra i valori E) per i trasporti su rotaia, ed è organizzata su tre colonne principali. La prima determina la tipologia di mezzo, mentre la seconda e la terza definiscono i consumi specifici in relazione alle modalità di trazione. I valori, suddivisi in base alla modalità di stoccaggio, sono disponibili per i mezzi alimentati a energia elettrica e diesel.

In modo analogo, la tabella 7.5 mostra i valori E) per i trasporti via mare. Anch'essa è organizzata in colonne. La prima determina la tipologia di mezzo, mentre la seconda definisce i valori caratteristici del consumo specifico in relazione alle modalità di stoccaggio delle merci. Se si adotta un trasporto via mare, è necessario porre attenzione all'unità di misura del carburante. Infatti, il consumo specifico è espresso in kg/tkm di *Heavy Fuel Oil* (HFO).

Tipologia di mezzo	Consumo specifico E) Trazione elettrica			Consumo specifico E) Trazione diesel		
	Impilati leggeri	Impilati medi/pesanti	Sfusi	Impilati leggeri	Impilati medi/pesanti	Sfusi
	kWh/tkm			kWh/tkm		
Treno 500 t (corto)	0,064	0,049	0,043	0,017	0,013	0,012
Treno 1000 t (medio)	0,042	0,032	0,028	0,011	0,009	0,008
Treno 1500 t (lungo)	0,032	0,025	0,022	0,009	0,007	0,006
Treno 2000 t (lungo)	0,027	0,021	0,018	0,007	0,006	0,005

Tabella 7.4 – Consumi specifici della categoria di trasporto su rotaia.

Nave porta container	Nave porta container		
	Impilati leggeri	Impilati medi/pesanti	Sfusi
	kg di HFO/tkm		
Valore medio su tutte le tratte	0,0089	0,0051	0,0037
Asia	0,0076	0,0044	0,0032
Transpacifico	0,0087	0,005	0,0036
Transatlantico	0,0089	0,0051	0,0037
Altre rotte	0,0096	0,0055	0,0040
Intercontinentale breve (es. Mediterraneo)	0,0123	0,0070	0,0051

Tabella 7.5 – Consumi specifici della categoria di trasporto via mare.

Step 6_Calcolo del consumo del mezzo

La sesta operazione prevede di determinare il consumo del mezzo, e si differenzia a seconda della tipologia di trasporto selezionata.

In merito al trasporto su gomma, la determinazione del consumo del mezzo F) deve essere effettuata mediante la formula 7:

$$[7] F = D \frac{[km] * E \left[\frac{l}{100km} \right]}{100} [l]$$

dove:

F = consumo del mezzo

D = distanza del viaggio (vedi Step 3)

E = consumo specifico (vedi Step 5)

Il valore così ottenuto deve poi essere moltiplicato per il numero di viaggi, calcolati nello Step 2.

La procedura di calcolo differisce leggermente nel caso siano stati selezionati gli scenari di trasporto su rotaia o via mare. La formula (8) per determinare il consumo del mezzo è la seguente:

$$[8] F = P[t] * D[km] * E \left[\frac{kWh}{100km} \right] o \left[\frac{l}{100km} \right] o \left[\frac{kg}{100km} \right] [kWh] o [l] o [kg]$$

dove:

F = consumo del mezzo (può essere espresso in chilowattora [kWh], litri [l] o chilogrammi [kg] a seconda della tipologia di combustibile impiegato dal mezzo di trasporto

P = tonnellate di prodotto da trasportare

D = distanza del viaggio (vedi Step 3)

E = consumo specifico (vedi Step 5)

Step 7_Calcolo dell'EC_{A4} dei Trasporti al cantiere

La contabilizzazione dell'EC_{A4} dei processi di trasporto si conclude moltiplicando il consumo del mezzo (gomma, rotaia e/o via mare) per il coefficiente di emissione gW. In particolare, in linea con i contenuti della UNI EN 16258:2013, è possibile quantificare l'EC come somma delle emissioni dirette e indirette relative alle operazioni di trasporto.

L'EC_{A4} può quindi essere determinata tramite la formula 9:

dove:

$$[9] EC_{A4} = \sum F[kWh] o [l] o [kg] * gW \left[\frac{kgCO_2}{kWh} \right] o \left[\frac{kgCO_2}{l} \right] o \left[\frac{kgCO_2}{kg} \right] [kgCO_2 eq]$$

F = consumo (può essere espresso in chilowattora [kWh], litri [l] o chilogrammi [kg] a seconda della tipologia di combustibile impiegato dal mezzo di trasporto

gW = coefficiente di emissione diretta e indiretta del processo di trasporto

Il coefficiente gW – (indicato sulla norma di riferimento con il termine *Well-To-Wheels* – WTW, ovvero dalla risorsa energetica alla ruota) – è un valore che può essere desunto dalla Tabella 7.6.

Vettore energetico	Coefficiente di emissione specifica gW		
	Embodied Carbon – Well-To-Whells (WTW)		
	kgCO ₂ eq/kWh	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq/kg
Diesel	-	3,24	3,90
Biodiesel	-	1,92	2,16
Heavy fuel oil (HFO)	-	3,31	3,41
Marine diesel oil (MDO)	-	3,53	3,92
Marine gas oil (MGO)	-	3,49	3,92
Energia elettrica	Sulla base del Mix Energetico Nazionale Vedi Fattori di emissione ISPRA [28]		-

Tabella 7.6 – Coefficienti di emissione specifica gW per differenti tipologie di combustibili.

In particolare, la Tabella 7.6 è organizzata in quattro colonne. La prima identifica la tipologia di combustibile impiegato, mentre le restanti definiscono il coefficiente di emissione gW in relazione al vettore energetico considerato. Si precisa che la norma UNI EN 16258:2013 non definisce il gW associato al consumo di energia elettrica. In questi casi, è necessario fare riferimento ai valori definiti da ISPRA su base dati TERNA (si veda *Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia 2021-V2* [28]).

7.1.2 Trasporti: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO prevede un coinvolgimento del produttore dei materiali o prodotti e un alto livello di analisi e dettaglio dei dati. Più precisamente, a fronte dell’elaborazione del computo metrico estimativo o a in relazione a informazioni puntuali rese disponibili dai fornitori dei materiali e/o prodotti, sarà possibile determinare le distanze precise per le operazioni di trasporto (A4).

In tal senso, a differenza del metodo BASE, dove le distanze di trasporto sono stimate secondo diversi scenari (vedi Step 3, paragrafo 7.1.1), il metodo AVANZATO richiede la pianificazione di distanze di trasporto reale, stabilendo le singole tratte (es.

dal produttore al cantiere, dal cantiere al sito di trattamento rifiuti, ecc.) o le multi-tratte (es. dal produttore al grossista e, successivamente, dal grossista al cantiere).

Seppur con un grado di dettaglio superiore rispetto al metodo BASE, il metodo AVANZATO non differisce nella procedura di calcolo. Pertanto, l’elaborazione dell’EC associata ai Trasporti al cantiere (A4) può essere svolta mediante i 7 Step descritti precedentemente, ponendo tuttavia una particolare attenzione nell’elaborazione dello Step 3 (Definizione della distanza di viaggio).

7.2 Determinazione dell’Embodied Carbon della fase di Costruzione (A5)

La fase di costruzione A5 si riferisce a tutte quelle operazioni svolte in cantiere, tramite l’ausilio di attrezzature e mezzi specifici.

La contabilizzazione dell’EC relativa alla fase di Costruzione A5 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO.

Il metodo BASE, associato alla fase di progettazione preliminare, necessita di informazioni generiche sulle

attrezzature e i mezzi impiegati nel cantiere, al fine di stimare le possibili emissioni.

Il metodo AVANZATO, applicabile nella fase di progettazione esecutiva o di costruzione, è caratterizzato da una contabilizzazione delle emissioni basata su informazioni precise inerenti le caratteristiche tecniche e le prestazioni delle attrezzature e dei mezzi impiegati in cantiere.

Per entrambi i metodi, la procedura di calcolo si avvale di fattori di emissione specifica. Questi ultimi, elaborati su base excel dal *South Coast Air Quality Management District* (South Coast AQMD), assumono la denominazione di fattori SCAB (*South Coast Air Basin fleet average emission factors*) e sono applicabili a differenti tipologie di mezzi tipicamente da cantiere che non circolano su strada, solitamente alimentati a gasolio, e definiti anche mezzi *off-roads*.

I dati SCAB sono disponibili secondo scenari temporali compresi tra il 2007 e il 2025. Per ogni anno considerato è possibile stimare le emissioni di CO₂ per differenti tipologie di mezzi e attrezzature di cantiere [29].

Nota: la procedura illustrata per determinare l'EC_{A5} dei processi di Costruzione, è anche applicabile alle operazioni di *Demolizione* (EC_{C1}) a fine vita del manufatto edilizio (si veda paragrafo 9.1 "*Determinazione dell'EC del processo di Demolizione* (C1)"). Può, inoltre, essere impiegata per la contabilizzazione delle operazioni di: *Demolizione preliminare, scavi e movimentazioni terra e ristrutturazioni*, ovvero, per fasi antecedenti la realizzazione del manufatto che, in casi documentati, è richiesto di comprendere nelle attività di contabilizzazione dell'EC. Per informazioni precise sulle modalità di valutazione, si rimanda al paragrafo 5.4 "*Tipologia di manufatti*". La contabilizzazione e la valutazione dell'EC richiede comunque di essere condotta separatamente per A5

e C1. Solamente in una fase successiva i rispettivi valori di EC potranno essere sommati, al fine di determinare la Whole Life Carbon.

Si ricorda, inoltre, che la procedura di calcolo richiede di essere applicata a tutte le attrezzature e i macchinari impiegati nelle operazioni di Costruzione. Tuttavia, in virtù della difficoltà nel reperire informazioni e dati su alcuni macchinari di piccole dimensioni, è ipotizzabile escludere dal calcolo alcuni di essi (es. trapani, avvitatori, luci, ecc.).

È pertanto compito del valutatore indicare quali attrezzature e macchinari sono oggetto di studio e quali sono esclusi nella contabilizzazione e valutazione dell'EC_{A5} ed eventualmente EC_{C1}.

7.2.1 Costruzione: Metodo BASE

La contabilizzazione dell'EC delle operazioni di Costruzione, secondo il metodo BASE, si allinea alle fasi precedentemente illustrate, prevedendo l'utilizzo di dati generici. Non è dunque richiesto di indicare i mezzi specifici di un produttore, è sufficiente studiare le prestazioni medie di un mezzo e/o di una attrezzatura.

La procedura prevede 5 step sequenziali.

Step 1_Calcolare il volume o il peso (totale) di un determinato materiale/prodotto/componente.

La prima operazione da svolgere prevede che vengano identificati i volumi o le quantità di ogni materiale e/o prodotto che sarà impiegato nelle operazioni di costruzione, tramite attrezzature e mezzi di cantiere. Si suggerisce di redigere un abaco che comprenda tutte le informazioni indispensabili per la contabilizzazione dell'EC. Se, ad esempio, un elemento tecnico è costituito da 200 m³ di calcestruzzo, è necessario stabilire quale sia il mix di materiali che lo compone: 60 t di cemento,

120 t di sabbia e 260 t di ghiaia (l'acqua, in ragione del suo basso impatto in termini di EC, può essere trascurata).

Step 2_ Identificazione dell'attrezzatura o del mezzo da utilizzare e del numero di ore di utilizzo.

La procedura di calcolo prevede che vengano identificate le potenziali attrezzature o macchinari utilizzati per svolgere una determinata operazione/lavorazione. Successivamente, è necessario stimare – avvalendosi di informazioni disponibili su pubblicazioni e siti dedicati – le produzioni orarie (m³/hr o kg/hr), al fine di determinare il loro tempo totale di utilizzo.

Richiamando l'esempio riportato nello Step 1, per impastare 200 m³ di calcestruzzo è possibile impiegare una miscelatrice alimentata a gasolio con una produzione oraria di 10 m³/hr. Di conseguenza, il numero di ore totale di utilizzo della miscelatrice è pari a 20.

Nel caso, invece, in cui si impieghi un macchinario alimentato a energia elettrica, è necessario stimare il consumo orario, espresso in chilowattora (kWh).

Step 3_Calcolo delle emissioni orarie.

La determinazione delle emissioni orarie può distinguersi in attrezzature e macchinari alimentati a gasolio e attrezzature e macchinari alimentati elettricamente.

Al fine di stabilire le emissioni orarie dei macchinari *off-road* alimentati a gasolio, questa sezione della procedura di calcolo utilizza come fonte dati il già citato report elaborato dal **South Coast AQMD** [29].

Si riporta, a titolo esemplificativo, un estratto del documento, nella Tabella 7.7, in cui si illustrano le informazioni relative alla categoria di attrezzature "Sollevatori/Elevatori aerei". All'interno dello stesso documento è possibile identificare altre tipologie di attrezzature e/o macchinari (es. miscelatori, gru, escavatori, ecc.).

Attrezzatura	MaxHP	lb/hr						
		ROG	CO	NO _x	SO _x	PM	CO ₂	CH ₄
Aerial Lifts Sollevatori/ Elevatori aerei	15	0,0101	0,0528	0,0631	0,0001	0,0025	8,7	0,0009
	25	0,0134	0,0454	0,0845	0,0001	0,0033	11,0	0,0012
	50	0,0213	0,1388	0,1328	0,0003	0,0053	19,6	0,0019
	120	0,0216	0,2275	0,1829	0,0004	0,0096	38,1	0,0020
	500	0,0668	0,3746	0,5339	0,0021	0,0167	213	0,0060
	750	0,1217	0,6772	0,9849	0,0039	0,0305	385	0,0110
Dato medio aggregato		0,0222	0,1667	0,1619	0,0004	0,0071	34,7	0,0020

Tabella 7.7 – Fattori SCAB per la categoria di attrezzature "Sollevatori/Elevatori aerei"

Utilizzando il foglio di calcolo SCAB, è necessario seguire una procedura suddivisa in 4 momenti, che prevede di:

1. identificare la categoria di attrezzatura (colonna *Equipment* della Tab. 7.7);
2. selezionare il dato medio aggregato per la specifica attrezzatura (riga *Composite* della Tab. 7.7);
3. moltiplicare il numero di ore di utilizzo (vedi Step 2) per la colonna CO₂ (anidride carbonica) e la colonna CH₄ (metano);
4. dividere il valore ottenuto dalla somma delle emissioni di CO₂ (anidride carbonica) e di CH₄ (metano) per [2,205], al fine di convertirlo da libbre in chilogrammi, così come illustrato nella formula 10.

Si noti che CO₂ (anidride carbonica) e CH₄ (metano) sono gli unici due gas, presenti all'interno del foglio, che contribuiscono al Global Warming Potential (GWP) e, pertanto, gli unici a dover essere inclusi nella procedura di calcolo dell'EC.

$$[10] \text{ Emissioni di CO}_2 = \text{Emissioni di CH}_4 = \frac{A[\text{hr}] * B \left[\frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right]}{2,205} \quad \left[\text{kgCO}_2 \right] \left[\text{kgCH}_4 \right]$$

dove:

A = produzione oraria del macchinario

B = emissione oraria aggregata (riga *Composite*)

Se il macchinario – selezionato per svolgere una determinata operazione di cantiere – è alimentato elettricamente, sarà necessario moltiplicare il numero di ore di utilizzo per il coefficiente di emissione specifico dell'energia elettrica, stimato sulla base del mix energetico italiano. A tal proposito, è necessario fare riferimento al foglio di calcolo elaborato da ISPRA su base dati TERNA (si veda *Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia_2021-V2* [28]).

Si precisa che i dati, presenti nella scheda 14 del documento, sono espressi in grammi di CO₂eq/kWh prodotto. Pertanto, in seguito alla conversione da grammi (g) a chilogrammi (kg), per i mezzi alimentati elettricamente è possibile saltare lo Step 4 e passare allo Step 5.

Step 4_Conversione dell'unità di misura delle emissioni di metano

La quarta parte della procedura di calcolo si riferisce alla conversione del metano, espresso in CH₄, in kgCO₂eq. L'operazione da svolgere (11), consiste nel moltiplicare il risultato del metano, ottenuto nel precedente Step, per 28.

$$[11] \text{ Emissioni di CH}_4 = \frac{A[\text{hr}] * B \left[\frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right]}{2,205} * fc \quad \left[\text{kgCO}_2 \text{eq} \right]$$

dove:

fc = fattore di conversione del metano CH₄ in CO₂eq. Il report (2013) dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha definito un fc pari a 28 [13].

Step 5_Calcolo dell'EC_{A5} dei processi di Costruzione

Il calcolo dell'EC_{A5} [kgCO₂eq] dei processi di costruzione, avviene secondo la formula 12:

$$[12] \text{ EC}_{A5} = \sum \text{Emissioni di CO}_2 \left[\text{kgCO}_2 \right] + \text{Emissioni di CH}_4 \quad \left[\text{kgCO}_2 \text{eq} \right]$$

7.2.2 Costruzione: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO, riferito alla fase di progettazione esecutiva e/o di costruzione, prevede: un coinvolgimento dell'impresa appaltatrice e/o esecutrice dei lavori e la disponibilità di dati puntuali su attrezzature e macchinari necessari allo svolgimento delle operazioni di Cantiere.

Più nel dettaglio, attraverso un corpus articolato di informazioni che comprendono relazioni tecniche e il computo metrico estimativo, è possibile determinare l'EC per la fase A5.

Per alcune tipologie di materiali e prodotti le informazioni sono riportate all'interno delle EPD nella sezione: *Cradle to grave and module D* (UNI EN 15804).

Seppur con un grado di dettaglio superiore rispetto al metodo BASE, il metodo AVANZATO non differisce nella procedura di calcolo. Di conseguenza, l'elaborazione dell'EC associata alle attività di Costruzione può essere svolta mediante i 5 Step presentati nel paragrafo 7.2.1. In particolare, rimangono invariati gli Step 1, 4 e 5, mentre per quanto concerne gli Step 2 e 3 si prevedono le seguenti integrazioni:

Step 2_ Identificazione dell'attrezzatura o del mezzo da utilizzare e del numero di ore di utilizzo

In questa sezione della procedura di calcolo è necessario identificare, oltre al macchinario e le sue ore di utilizzo, anche la potenza (kW) del macchinario stesso per svolgere una determinata operazione di Costruzione.

Step 3_Moltiplicare la produzione oraria per le emissioni orarie

Nella terza parte della procedura di calcolo, per le attrezzature e i mezzi alimentati a gasolio, è opportuno utilizzare un dato puntuale di emissione, calcolato tramite il valore di potenza del macchinario.

Grazie al foglio di calcolo SCAB (si veda Tabella 7.7), è possibile adottare una procedura suddivisa in 5 momenti che prevede di:

- 1) identificare la categoria di attrezzatura (si veda colonna *Equipment* della Tab. 7.7);
- 2) selezionare il dato specifico sulla potenza (si veda colonna *MaxHP* della Tab 7.7); si noti che i valori delle potenze sono espressi in Horse Power (HP), per convertirli in kW è necessario dividere il valore per 1,341;
- 3) stimare le emissioni; nel caso in cui non sia disponibile la potenza specifica per il macchinario preso in esame, è necessario stimare i valori mancanti di CO₂ e CH₄, tramite interpolazione lineare dei valori prossimi delle potenze, con la formula 13:

$$[13] \quad Y = (Y2 - Y1) * \frac{X-X1}{X2-X1} + Y1 \quad \left[\frac{lb}{hr} \right]$$

dove:

Y= valore di CO₂ o CH₄ che si intende determinare [lb/hr]

Y1= valore prossimo minore di CO₂ o CH₄ [lb/hr]

Y2= valore prossimo maggiore di CO₂ o CH₄ [lb/hr]

X= potenza del macchinario preso in esame [HP]

X1= valore prossimo minore della potenza [HP]

X2= valore prossimo maggiore della potenza [HP]

- 4) moltiplicare le ore totali di utilizzo del macchinario

(vedi Step 2) per il valore della colonna CO₂ (anidride carbonica) e della colonna CH₄ (metano) o, in alternativa, per il valore stimato tramite interpolazione lineare dei valori prossimi;

- 5) dividere il risultato ottenuto per i valori di CO₂ (anidride carbonica) e di CH₄ (metano) per 2,205 al fine di convertire il risultato da libbre in chilogrammi.

7.2.3 Valutazione dell'EC dei rifiuti da Costruzione: EC_{cw}

Il calcolo dell'EC_{cw} (Embodied Carbon of Construction Waste) si riferisce alle emissioni di quei materiali e prodotti che al termine del processo di costruzione del manufatto edilizio sono oggetto di deposito temporaneo e classificati come rifiuti speciali. La quantificazione dei rifiuti da Costruzione, in fase di progettazione preliminare ed esecutiva, costituisce in altre parole un'anticipazione della fase C3-4.

Le ragioni che portano alla produzione di rifiuti sono da ricondurre a numerosi fattori che comprendono: errori di progettazione, vincoli sulle quantità che sono acquistate, tecnologie di produzione in opera che di solito generano più scarti rispetto a tecnologie di prefabbricazione, ecc.

Molte fonti [9; 25; 30] indicano valori compresi tra 1% e 10% di rifiuti in fase di Costruzione rispetto al totale dei materiali e dei prodotti acquisiti. La Tabella 7.8 restituisce le percentuali da applicare in mancanza di informazioni più precise (si veda paragrafo 6.1 "EC con dati Bill-of-quantities" e "EC con dati Design-as-built").

Per quanto attiene la procedura di contabilizzazione dell'EC, si rimanda al paragrafo 9.3: "Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Trattamento rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)".

Materiale/Prodotto	Percentuali di rifiuto
Calcestruzzo realizzato in sito	5%
Calcestruzzo prefabbricato (travi, pilastri, ecc.)	1%
Acciaio rinforzato, barre per cls armato posate in sito	5%
Acciaio (telai e profili)	1%
Blocchi	20%
Laterizi	20%
Profili di legno (travi, pilastri, sostegni)	1%
Pavimenti in legno (travetti e tavole)	10%
Cartongesso	22,5%
Protezioni antincendio cementizia a spruzzo	10%

Tabella 7.8 – Percentuali di rifiuti da costruzione rispetto al totale generalmente acquistato [25].

8 Uso (B1-B2-B3-B4-B5)

La fase d'Uso comprende 5 sottofasi previste nello standard UNI EN 15978:2011: uso del manufatto edilizio (B1); manutenzione (B2); riparazione (B3); sostituzione (B4); ristrutturazione (B5). Le informazioni relative al manufatto edilizio coincidono con le quantità di materiali e prodotti effettivamente utilizzate per la realizzazione (o che si prevede verranno utilizzate). Si tratta cioè di passare da flussi di input (quantità in ingresso nei processi) riferiti a *Bill-of-quantity* (come raccomandato per le fasi A1-A3 e A4-A5) a flussi di input riferiti a *Design-as-built*.

Fa eccezione il processo B4 (sostituzione) nel quale i materiali e i prodotti sostituiti, rispetto allo scenario temporale di riferimento, sono ancora determinati sulla *Bill-of-quantity*, in considerazione della sua relazione con le fasi di produzione, trasporto e costruzione.

8.1 Determinazione dell'Embodied Carbon della fase d'Uso (B1)

La fase d'Uso B1, in conformità alle indicazioni di cui al paragrafo 5.5, è da relazionare allo **scenario temporale di riferimento** di contabilizzazione e valutazione dell'EC di un manufatto edilizio.

In particolare, questa fase prevede che si determinino le emissioni di CO₂ equivalente associate all'utilizzo degli elementi tecnici e degli elementi di impianto lungo un periodo stabilito (numero di anni), con l'esclusione delle emissioni associate all'*Operational Carbon* (fase B6).

Tale esclusione limita il processo di contabilizzazione ad alcuni processi specifici, in particolare:

- i rilasci di gas a effetto serra imputabili all'impiego di gas refrigeranti utilizzati per il funzionamento degli elementi di impianto;
- l'assorbimento di CO₂ – *carbon uptake* – dei prodotti a base cemento dovuto ai fenomeni di carbonatazione;
- i rilasci di sostanze a effetto serra associati a vernici, schiume e superfici resilienti che delimitano gli spazi confinati del manufatto edilizio;
- l'assorbimento di CO₂ da parte di alcune tipologie di finiture per esterni e per interni;
- lo stoccaggio di CO₂ dovuto alla presenza di tecnologie vegetali (ad esempio, *green roof*) integrate nel manufatto edilizio o facenti parte dell'impronta complessiva del manufatto (es. lotto sul quale si posiziona il manufatto).

La contabilizzazione dell'EC relativa alla fase d'uso B1 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO.

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto, da EPD o altre certificazioni.

8.1.1 Uso: Metodo BASE

In conformità a quanto descritto nel paragrafo 8.1, la contabilizzazione dell'EC con il metodo BASE consente di determinare le potenziali emissioni di CO₂ equivalente (al netto della componente B6 – *Operational*) e il potenziale assorbimento di CO₂.

La procedura prevede 2 step sequenziali di calcolo dell'EC_{B1} della fase d'uso.

Step 1_Identificazione delle sostanze, dei materiali e degli strati funzionali

La prima operazione da svolgere prevede che vengano identificati i materiali e prodotti che possono rilasciare CO₂ equivalente, assorbire CO₂ e/o stoccare carbonio nel loro ciclo di esistenza.

Si raccomanda in particolare di porre attenzione alle seguenti tipologie:

- elementi di impianto (meccanici, elettrici e idraulici), in altre parole gli elementi che la TM65 [31] definisce come MEP: Mechanical, Electrical and Plumbing. Data la complessità nel valutare tali emissioni, si rimanda al capitolo 12, in cui si illustrano le modalità di calcolo dell'EC del MEP;
- elementi tecnici realizzati a base cemento;
- rivestimenti, pitture, finiture che rilascino emissioni che possano essere contabilizzate in CO₂ equivalenti;

- rivestimenti, pitture, finiture che assorbano CO₂ che possano essere contabilizzate e valutate (ad esempio pitture al grafene);
- coperture e chiusure vegetate (tetti e facciate verdi), alberature e arbusti facenti parte dell'involucro del manufatto o al servizio dello stesso.

Con riferimento all'ultima voce dell'elenco si ricorda che la componente di carbonio o di CO₂ stoccata nei materiali e prodotti in legno e/o a base legno, classificati in fase A1-A3, non viene considerata in questa fase. Si considerano solo le componenti vegetate cui corrisponde un processo di evapotraspirazione e accrescimento nello scenario temporale di riferimento.

Per ulteriori approfondimenti su altre soluzioni di tecnologie vegetate si faccia riferimento BOX 7 "Carbon Off-Setting".

Step 2_Calcolo dell'EC_{B1} delle sostanze, dei materiali e degli strati funzionali

La contabilizzazione dell'EC della fase d'uso (B1) avviene:

1. definendo lo scenario temporale di riferimento (numero di anni);
2. moltiplicando le quantità di emissioni rilasciate in atmosfera per i corrispondenti fattori di emissione specifica;
3. determinando le quantità di CO₂ assorbita dal materiale o dalla tecnologia vegetale.

L'EC può essere determinata con la seguente formula 14:

$$[14] \quad EC_{B1} = \sum_{j=1}^n [GHG_j * FES_{B1-j}] - CU_{B1-j} - CO_{S_{B1-j}}$$

[kg CO₂eq]

dove:

EC_{B1} = bilancio dell'Embodied Carbon degli j-esimi materiali/sostanze utilizzati nel manufatto edilizio (kg CO₂eq) determinato rispetto allo scenario temporale di riferimento;

n = numero di anni considerati;

GHG_j = rilascio di gas a effetto serra dello j-esima sostanza utilizzata in un elemento tecnico del manufatto edilizio, determinato rispetto allo scenario temporale di riferimento (kg);

FES_{B1-j} = fattore di emissione specifica di conversione in CO₂ equivalente della j-esima sostanza rilasciata dall'elemento tecnico;

CU_{B1-j} = quantità di CO₂ assorbita dallo j-esimo strato di materiali a base cemento, determinata rispetto allo scenario temporale di riferimento (kgCO₂) (si veda BOX 3);

CO_{S_{B1-j}}} = quantità di CO₂ assorbita o stoccata dallo j-esimo strato (di finitura e/o vegetale), determinata rispetto allo scenario temporale di riferimento (kgCO₂).

In assenza di rilasci di gas a effetto serra associati a elementi tecnici, l'EC_{B1} può assumere un valore negativo; come tale è da inserire nella contabilizzazione della Whole Life Carbon.

Per approfondimenti inerenti alla metodologia di quantificazione della CO₂ assorbita dai materiali a base cemento (*carbon uptake*) si rimanda al BOX 3, mentre per ulteriori informazioni sulle modalità di quantificazione della CO₂ assorbita dalle tecnologie vegetali utilizzate in progetto si rimanda al BOX 7.

Per quanto attiene, invece, la quantificazione dei rilasci di gas a effetto serra associati all'utilizzo di Impianti e Servizi si rimanda al paragrafo 12.

Infine, la quantità di CO₂ assorbita da materiali di rivestimento per esterni ed interni può essere ricavata da banche dati che contengono *generic data*.

8.1.2 Uso: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO prevede che le informazioni oggetto di elaborazione siano fornite dal produttore o comunque disponibili in schede tecniche di materiali e prodotti e di elementi di impianto.

Più nel dettaglio, attraverso il computo metrico estimativo e altra documentazione tecnica – in cui sono descritti con precisione i materiali e i prodotti che costituiranno il manufatto edilizio – è possibile determinare rilasci e assorbimenti per la fase B1.

Rispetto al metodo BASE, dove le quantità di rilascio di assorbimenti di gas a effetto serra sono riferiti a dati generici, il metodo AVANZATO richiede la raccolta di informazioni e la loro interpretazione per poter caratterizzare in modo appropriato questa fase.

Per alcune tipologie di materiali e prodotti le informazioni sono riportate all'interno delle EPD classificate come: *Cradle to grave and module D* (UNI EN 15804).

Sebbene caratterizzato da un livello di dettaglio differente rispetto al metodo BASE, il metodo AVANZATO non differisce nella procedura di calcolo. L'EC associata alla fase uso (B1) può essere determinata mediante i 2 Step di cui al paragrafo 8.1.1.

Anche per il metodo AVANZATO è necessario evitare il rischio di una doppia contabilizzazione dei rilasci di gas a effetto serra imputabili all'impiego di refrigeranti nei MEP.

BOX 3: Carbon Uptake dei prodotti a base cemento – Uso: CU_{B1}

Il BOX 3 definisce le modalità di contabilizzazione della Carbon Uptake (CU), ovvero l'assorbimento di anidride carbonica (CO₂) di prodotti a base cemento. Il BOX intende fornire le linee guida per la determinazione della CU_{B1} nella fase B (Uso) del ciclo di vita del manufatto edilizio.

È opportuno precisare che il fenomeno della CU si verifica anche nella fase di Fine Vita (C). Tale valutazione (CU_{C3+C4}) è oggetto di approfondimento nel BOX 6.

L'assorbimento di CO₂ è un fenomeno legato al processo di carbonatazione che colpisce il materiale. La carbonatazione del cemento è una reazione chimica naturale che si verifica nei prodotti esposti all'aria, sia in ambiente interno sia in ambiente esterno. Il processo ha inizio con la penetrazione della CO₂ nei pori del cemento e, successivamente, con la reazione tra le molecole di CO₂ e le molecole di idrossido di calcio – Ca(OH)₂ – che danno luogo alla formazione di carbonato di calcio – CaCO₃. Pertanto, la carbonatazione è un fenomeno che si sviluppa sulla superficie del prodotto e, lentamente, progredisce verso l'interno.

La carbonatazione del cemento non è un processo pericoloso per i **manufatti non armati**, poiché non provoca danni di tipo meccanico e chimico, può invece portare a un aumento delle resistenze meccaniche (in virtù dell'occlusione dei pori). Di tutt'altro tenore è lo scenario relativo ai **manufatti armati**, in cui il processo di carbonatazione comporta una riduzione del pH del conglomerato, con relativa perdita della protezione anticorrosiva della pasta cementizia. Tale condizione lascia, infatti, i ferri d'armatura esposti a umidità e ossigeno, con relativo innesco dei fenomeni di corrosione e conseguente perdita di prestazioni e di sicurezza delle strutture.

La procedura di calcolo per determinare la CU è applicabile per entrambi i metodi (BASE e AVANZATO) ed è desunta dalle indicazioni presenti nella norma BS EN 16757:2017: *Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Product Category Rules for concrete and concrete elements* – con particolare riferimento all'Annex BB: CO₂ uptake by carbonation – Guidance on calculation – e nella norma PD CEN/TR 17310:2019: *Carbonation and CO₂ uptake in concrete*.

La potenziale CO₂ assorbita dal fenomeno di carbonatazione è subordinata al totale delle molecole reattive di ossido di calcio (CaO) presenti nel clinker. La prima operazione da svolgere, per determinare la CU, consiste nel determinare il massimo assorbimento teorico di CO₂ in un cemento totalmente carbonatato. Il valore di Utcc, espresso in kgCO₂/kg di cemento, si ottiene mediante la seguente formula 15:

$$[15] \quad Utcc = w * Cc * \left(\frac{m_{CO_2}}{m_{CaO}} \right) \quad \left[\frac{kgCO_2}{kg} \right]$$

dove:

Utcc = massimo assorbimento teorico di CO₂ in un cemento totalmente carbonatato

w = porzione reattiva di ossido di calcio (kgCaO/kg di legante)

Cc = massa del clinker (kg)

m_{CO₂} = peso molare CO₂ = 44 g/mol

m_{CaO} = peso molare CaO = 56 g/mol

Ad esempio, l'applicazione della formula 15 a un cemento Portland CEM I, costituito da un quantitativo ≥ 95% di clinker e una porzione reattiva di CaO del 65%, consente di ottenere un valore teorico di assorbimento di CO₂ pari a 0,49 kgCO₂/kg di cemento. Il valore del massimo assorbimento teorico è quindi influenzato dalla composizione del clinker, che determina una variazione nella porzione reattiva di CaO.

La Tabella B3.1 definisce i valori di massimo assorbimento teorico di CO₂ in funzione della tipologia di cemento ai sensi della norma UNI EN 197-1.

Tipo	Tipologia di cemento	Sigla sottotipo	Clinker (%)	Utcc (kgCO ₂ /kg)
CEM I	Cemento Portland (CP)	CEM I	95-100	0,49
CEM II	CP - loppa d'altoforno	CEM II/A-S	80-88	0,41-0,48
		CEM II/B-S	65-79	0,34-0,41
	CP - fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	0,46-0,48
	CP - pozzolana naturale	CEM II/A-P	80-94	0,41-0,48
		CEM II/B-P	65-79	0,34-0,41
	CP - pozzolana calcinata	CEM II/A-Q	80-94	0,41-0,48
		CEM II/B-Q	65-79	0,34-0,41
	CP - ceneri volanti silicee	CEM II/A-V	80-94	0,41-0,48
		CEM II/B-V	65-79	0,34-0,41
	CP - ceneri volanti calcaree	CEM II/A-W	80-94	0,41-0,48
		CEM II/B-W	65-79	0,34-0,41
	CP - scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	0,41-0,48
		CEM II/B-T	65-79	0,34-0,41
	CP - calcare	CEM II/A-L	80-94	0,41-0,48
CEM II/B-L		65-79	0,34-0,41	
CEM II/A-LL		80-94	0,41-0,48	
CEM II/B-LL		65-79	0,34-0,41	
CP - composito	CEM II/A-M	80-88	0,41-0,48	
	CEM II/B-M	65-79	0,34-0,41	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	0,18-0,33
		CEM III/B	20-34	0,10-0,18
		CEM III/C	5-19	0,03-0,10
CEM IV	Cemento pozzolanico	CEM IV/A	65-89	0,34-0,46
		CEM IV/B	45-64	0,23-0,33
CEM V	Cemento composito	CEM V/A	40-64	0,21-0,33
		CEM V/B	20-38	0,10-0,20

Tabella B3.1 – Massimo assorbimento teorico di CO₂ per differenti tipologie di cemento ai sensi della norma UNI EN 197.1 [32].

La seconda operazione della procedura di calcolo, prevede di determinare due fattori (Tab. B3.2): il grado di carbonatazione (Dc) e il progressivo fronte di carbonatazione (d). Il primo, è un fattore tabellare, espresso in %, che determina la porzione di CaO che si è trasformata – a seguito dei fenomeni di carbonatazione – in CaCO₃. Il secondo, espresso in mm, definisce l'avanzamento del fenomeno di carbonatazione dalla superficie dell'elemento verso l'interno, e si calcola con la formula 16:

$$[16] \quad d = k * \sqrt{t} \quad [\text{mm}]$$

dove:

- d = profondità di carbonatazione (mm)
- k = fattore tabellare (mm/anno^{0,5})
- t = tempo (anni)

STRUMENTI PER LA DECARBONIZZAZIONE:
contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio

Resistenza calcestruzzo provino cilindrico	< 15 MPa	15 – 20 MPa	25 – 30 MPa	> 35 MPa	Grado di carbonatazione (Dc)
Parametro	Valore del fattore k espresso in mm/anno ^{0,5}				Percentuale (%)
Infrastrutture					
Esposte alla pioggia (O)		2,7	1,6	1,1	85
Riparate dalla pioggia (O)		6,6	4,4	2,7	75
Interrate ^A (O)		1,1	0,8	0,5	85
Edifici					
Esposti alla pioggia (O)	5,5	2,7	1,6	1,1	85
Riparati dalla pioggia (O)	11	6,6	4,4	2,7	75
Rivestiti ^B (I)	11,6	6,9	4,6	2,7	40
Non rivestiti	16,5	9,9	6,6	3,8	40
Interrati ^A (I)		1,1	0,8	0,5	85
O = manufatti edilizi outdoor I = manufatti edilizi indoor					
^A Per i manufatti edilizi, sia infrastrutture sia edifici, il valore k da assumere per le strutture immerse in acqua è pari a 0,2					
^B I rivestimenti possono essere vernici o carta da parati					

Tabella B3.2 – Fattore k e Grado di carbonatazione (Dc) per differenti scenari di esposizione.

Nota: le superfici e gli elementi in cemento o calcestruzzo inglobati, quali per esempio i massetti di sottofondo, non sono oggetto di valutazione della CU_{B1} nella fase d'uso (B).

La terza operazione della procedura di calcolo prevede di correggere il fattore k, nel caso in cui si adottino costituenti diversi nel clinker (es. calcare, cenere volante, ecc.). Sempre in accordo con la normativa, si prevede di moltiplicare il fattore k per un fattore correttivo Kk, riportato in Tabella B3.3.

Quantitativo sostituito (%)	≤ 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 60	60 – 80
Calcare		1,05	1,1			
Fumo di silice	1,05	1,10				
Ceneri volanti		1,05		1,10		
GGBS	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30

Tabella B3.3 – Fattori correttivi Kk per differenti tipologie di costituenti addizionali (%).

In seguito alla definizione di tutti i fattori agenti sulla contabilizzazione della CU_{B1} , la determinazione della CO_2 assorbita dai prodotti a base cemento per la fase d'uso (B1) – in linea con le prescrizioni normative – si calcola mediante la formula 17:

$$[17] \quad CU_{B1} = \left(\sum_{i=1}^n k_i * K_{ki} * Dc_i * A_i \right) * (\sqrt{t_{B1}/1000}) * Utcc_i * CP_i \quad [kgCO_2eq]$$

dove:

CU_{B1} = Carbon Uptake fase B1 (kgCO₂)

k_i = fattore k dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.2) (mm/anno^{0,5})

K_{ki} = fattore Kk correttivo dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.3) (%)

Dc_i = grado di carbonatazione dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.2) (%)

A_i = area della i-esima superficie esposta (m²)

t = scenario temporale definito nella fase B1 (anni)

$Utcc_i$ = massimo assorbimento teorico di CO₂ dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.1) (kgCO₂/kg)

CP_i = contenuto di cemento nella miscela di i-esimo prodotto (kg/m³)

Al termine della procedura di calcolo, la Carbon Uptake della fase B (CU_{B1}) è da intendersi come un assorbimento della CO₂ da parte dello i-esimo materiale o prodotto a base cemento e, pertanto, da contabilizzare nel bilancio Whole Life Carbon di un manufatto edilizio con segno [-].

8.2 Determinazione dell'Embodied Carbon della fase di Manutenzione (B2) e Riparazione (B3)

Le fasi di manutenzione (B2) e riparazione (B3) comprendono le attività di protezione e di conservazione degli elementi tecnici e degli elementi di impianto e servizi, nonché le attività di riparazione o le piccole sostituzioni con cui si ripristinano le prestazioni originali degli elementi. La contabilizzazione e la valutazione dell'EC associata alla manutenzione e riparazione del manufatto edilizio avviene rispetto allo scenario temporale di riferimento.

In particolare, si prevede che si determinino le emissioni di CO₂ equivalente associate alle operazioni

di pulizia, di piccole sostituzioni di parti di elementi che abbiano raggiunto l'obsolescenza funzionale, di tinteggiatura, ecc. Possono inoltre essere inclusi i fabbisogni energetici, in particolare fabbisogni elettrici, non inclusi nella contabilizzazione delle emissioni associate all'*Operational Carbon* (fase B6).

La contabilizzazione dell'EC delle operazioni di manutenzione e riparazione può includere:

- la produzione (A1-A3) e il trasporto (A4) dei materiali e dei prodotti che verranno impiegati per pulizia, verniciatura, piccole sostituzioni, ecc.;
- il trasporto (C2) dei rifiuti generati a valle del processo di pulizia, verniciatura, piccole sostituzioni, ecc.;
- gli scenari *End-of-Life* (C3-C4) dei rifiuti, di cui al punto precedente.

La contabilizzazione dell'EC relativa alle fasi di manutenzione B2-B3 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO:

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. Il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto, da EPD o altre certificazioni.

8.2.1 Manutenzione e Riparazione: Metodo BASE

In conformità a quanto descritto nel paragrafo 8.2 la contabilizzazione dell'EC_{B2-B3} con il metodo BASE consente di determinare le potenziali emissioni di CO₂ equivalente (al netto della componente B6 – *Operational Carbon*). L'incidenza dell'impatto in termini di CO₂ equivalente di questa fase dipende dallo scenario temporale di riferimento (paragrafo 5.5).

In fase di progettazione preliminare la contabilizzazione e la valutazione dell'EC_{B2-B3} è difficile, specie in assenza di un piano o della guida

alla manutenzione programmata del manufatto edilizio. Laddove ci siano informazioni sulle emissioni associate a questa fase si raccomanda di segnalarle separatamente nel report di valutazione della Whole Life Carbon.

In alternativa è possibile utilizzare i valori desunti da riferimenti tecnici [10; 11; 33] riportati nella Tabella 8.1.

In virtù delle modeste quantità di rifiuti prodotti in queste due fasi, la contabilizzazione della EC delle fasi di trasporto (C2), trattamento dei rifiuti (C3) e dismissione finale (C4) è da considerare trascurabile. Qualora le caratteristiche del manufatto comportino una significativa produzione dei rifiuti, a valle delle operazioni di manutenzione e riparazione, è cura del valutatore motivare l'inclusione nel processo di contabilizzazione dell'EC_{C2-C4} (compresa tra C2 e C4). È sempre cura del valutatore stabilire se la contabilizzazione si attualizza all'anno zero (anno di realizzazione del manufatto) o se è indicata negli anni in cui sono previste le operazioni di manutenzione e riparazione.

Per la metodologia di contabilizzazione delle fasi comprese tra C2 e C4 si rimanda ai corrispondenti paragrafi.

Tipologia di manufatto	Embodied Carbon fasi di manutenzione e riparazione - EC _{B2+B3} (kgCO ₂ eq)
Manufatti edilizi destinati a uso abitativo	10 kgCO ₂ eq/m ² di superficie lorda di pavimento $EC_{B2} = (10 * SLP) = \text{totkgCO}_2\text{eq}$
Manufatti edilizi destinati ad altre funzioni	1% dell'EC ottenuta sommando le fasi comprese tra A1 e A5 $EC_{B2} = [\sum EC_{A1-A5} * 0,01] = \text{totkgCO}_2\text{eq}$
Tutti i manufatti	25% dell'EC _{B2} $EC_{B3} = [\sum EC_{B2} * 0,25] = \text{totkgCO}_2\text{eq}$

Tabella 8.1 – Determinazione dell'EC per le fasi di Manutenzione B2 e Riparazione B3 di un manufatto edilizio.

8.2.2 Manutenzione e Riparazione: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO prevede che le informazioni oggetto di elaborazione siano fornite dal produttore o comunque disponibili in schede tecniche di materiali e prodotti e di elementi di impianto.

Più nel dettaglio, attraverso un corpus articolato di informazioni che comprendono relazioni tecniche e, qualora disponibili, libretti e piani di manutenzione del manufatto edilizio è possibile determinare la EC per le fasi B2 e B3.

Rispetto al metodo BASE, dove le quantità di CO₂ equivalente sono desunte da algoritmi semplificati, il metodo AVANZATO richiede la disponibilità di dati e la loro interpretazione, in modo da poter caratterizzare in modo appropriato queste fasi.

Per alcune tipologie di materiali e prodotti le informazioni sono riportate all'interno delle EPD classificate come: *Cradle to grave and module D* (UNI EN 15804).

La procedura prevede 2 principali Step di calcolo dell'EC_{B2-B3}.

Step 1_Identificazione degli elementi tecnici e degli elementi di impianto

La prima operazione prevede che vengano identificati i materiali e prodotti che richiedono di essere sottoposti a operazioni di manutenzione e riparazione. Il processo di contabilizzazione e valutazione dell'EC riguarda gli elementi tecnici e di impianto definiti in Tabella 5.2 e classificati in raccomandati e facoltativi. Gli elementi tecnici e di impianto per i quali, in fase di avvio dello studio, si è stabilito di condurre la valutazione, sono gli stessi su cui concentrare la raccolta dei dati utili a caratterizzare questa fase.

Step 2_Calcolo dell'EC_{B2} delle operazioni di manutenzione

La contabilizzazione dell'EC delle fasi di manutenzione (B2) e riparazione (B3) avviene:

- determinando i fabbisogni di energia elettrica necessaria per le operazioni di manutenzione e riparazione (kWh) sulla base dello scenario temporale di riferimento (numero anni);
- moltiplicando i fabbisogni di energia elettrica per il fattore di emissione specifica corrispondente, per determinare l'emissione di CO₂ equivalente (kgCO₂eq);
- determinando la quantità di materiali e prodotti necessari alle operazioni di manutenzione e riparazione e, successivamente, calcolando il corrispondente valore di EC secondo la formula 1 (EC_{A1-A3}), la formula 9 (EC_{A4}) e la formula 12 (EC_{A5});
- moltiplicando l'EC dei materiali e prodotti necessari alle operazioni di manutenzione e riparazione per il numero di volte in cui si stima che tali operazioni vengano effettuate, sulla base dello scenario temporale di riferimento;
- determinando le quantità di CO₂ equivalente dichiarate nelle EPD.

L'EC può essere determinata con la seguente formula 18:

$$[18] \quad EC_{B2-B3} = \sum_{j=1}^n [FEI_{B2-B3-j} * FES_{B2-B3-j}] + EC_{B2-B3-j} + EC_{A1-A5-j} \quad [kg \ CO_2 \ eq]$$

dove:

EC_{B2-B3} = Embodied Carbon degli j-esimi elementi tecnici e di impianto sottoposti a operazioni di manutenzione e riparazione (kgCO₂eq) determinata rispetto allo scenario temporale di riferimento (numero anni)

$FEI_{B2-B3-j}$ = Fabbisogno di energia elettrica per le operazioni di manutenzione e riparazione dello j-esimo materiale (kWh). $FEI_{B2-B3-j}$ si ottiene moltiplicando il fabbisogno stimato per un intervento di manutenzione e/o riparazione per il numero di interventi programmati rispetto allo scenario temporale di riferimento

$FES_{B2-B3-j}$ = fattore di emissione specifica di conversione in CO₂ equivalente dei fabbisogni elettrici per le operazioni di manutenzione e riparazione dello j-esimo materiale

$EC_{B2-B3-j}$ = EC dello j-esimo materiale dotato di certificazione EPD per il quale sono disponibili informazioni inerenti alle operazioni di manutenzione e riparazione. $EC_{B2-B3-j}$ si ottiene moltiplicando l'EC determinata nella EPD per un intervento di manutenzione e/o riparazione per il numero di interventi

programmati rispetto allo scenario temporale di riferimento.

$EC_{A1-A5-j}$ = EC dello j-esimo materiale utilizzato per le operazioni di manutenzione e per operazioni di riparazione (kgCO₂) non compreso nella determinazione dell' $EC_{B2-B3-j}$. $EC_{A1-A5-j}$ si ottiene moltiplicando l'EC stimata per un intervento di manutenzione e/o riparazione per il numero di interventi programmati rispetto allo scenario temporale di riferimento.

In particolare, la distinzione tra $EC_{A1-A5-j}$ e $EC_{B2-B3-j}$ è necessaria qualora per alcuni materiali e prodotti non si disponga di una EPD o di altra certificazione ambientale.

La Tabella 8.2 riassume alcuni dati inerenti alle operazioni di manutenzione e riparazione che è possibile programmare nello scenario temporale di riferimento. La prima colonna indica la tipologia di intervento e la seconda indica i fabbisogni di tipo elettrico rispetto a un'unità di riferimento.

In relazione al programma di manutenzione previsto è possibile quantificare la superficie interessata dall'intervento e successivamente il fabbisogno di energia elettrica.

Anche per il metodo AVANZATO la contabilizzazione della EC dei rifiuti generati dalle operazioni di manutenzione e riparazione è considerata trascurabile. L'eventuale valutazione dell' EC_{C2-C4} segue le medesime indicazioni descritte per il metodo BASE.

Tipologia di operazione	Informazioni specifiche sull'operazione
Aspirazione	0,02 kWh di energia elettrica (low voltage) per m ² di superficie
Pulizia con acqua	5 litri di acqua potabile per 60 m ² di superficie, equivalente a 0,083 litri di acqua per m ² di superficie.
Pulizia con acqua e sapone	5 litri di acqua potabile per 60 m ² di superficie con 1,5 tappi da 30 ml di detergente multiuso, equivalente a 0,083 litri di acqua per m ² di superficie e 0,009 litri di detergente per m ² di superficie.
Pulizia con pulitore ad alta pressione	330 litri di acqua potabile e 1,5 kWh di energia elettrica (low voltage) per ogni ora di utilizzo del pulitore ad alta pressione.

Tabella 8.2 – Tipologie di operazioni per la manutenzione di un manufatto edilizio [60].

8.3 Determinazione dell'Embodied Carbon della fase di Sostituzione (B4)

La fase di sostituzione (B4) comprende interventi di manutenzione sul manufatto edilizio che prevedono la rimozione di interi strati funzionali costituiti da materiali e prodotti, appartenenti a un elemento tecnico e/o di impianto, e alla loro reinstallazione o ricostruzione con nuovi materiali e prodotti (non necessariamente gli stessi originariamente progettati e messi in opera).

Per alcune tipologie di elementi tecnici e di impianto è possibile che lo stesso elemento sia integralmente sostituito (ad esempio, la sostituzione di una caldaia).

Tale fase richiede di essere verificata per tutti gli elementi tecnici e di impianto selezionati nel sistema di contabilizzazione e di valutazione del manufatto e riguarda materiali, prodotti e, in alcuni casi, elementi tecnici e di impianto, la cui durata è inferiore allo scenario temporale di riferimento stabilito.

Lo studio dei processi di sostituzione è da considerare necessario, se si intende garantire la continuità nel soddisfacimento delle prestazioni funzionali, tecniche e di comfort del manufatto edilizio.

Per approfondimenti relativi alla valutazione della fase B4 per gli elementi di impianto, si rimanda al capitolo 12.

In particolare, si prevede che si determinino le emissioni di CO₂ equivalente associate a:

- produzione (A1-A3) di nuovi materiali e prodotti che sostituiranno quelli esistenti;
- trasporto (A4) dei materiali e prodotti che sostituiranno quelli esistenti;
- posa in opera e costruzione (A5) dei materiali e prodotti che sostituiranno quelli esistenti;
- generazione di rifiuti (C1) dovuti alla rimozione di materiali e prodotti esistenti;
- trasporto dei rifiuti (C2) generati al di fuori dell'area di cantiere (ad esempio, conferimento presso la discarica di rifiuti speciali);
- trattamento dei rifiuti (C3) e loro dismissione finale (C4).

La contabilizzazione dell'EC relativa alla fase di sostituzione B4 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO.

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. Il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto, da EPD, o altra certificazione.

BOX 4: Determinazione del fattore di sostituzione (*replacement factor*)

Propedeutica alla fase di contabilizzazione della EC della fase di sostituzione è la stima della durata dei materiali e dei prodotti rispetto allo scenario temporale di riferimento.

I principi, i criteri e i metodi con cui è possibile stimare la durata di un materiale o di un elemento (sia tecnico sia di impianto) sono trattati in un quadro di norme internazionali che appartengono alla famiglia degli standard ISO 15000. Si tratta della famiglia delle ISO 15686 - *Building and constructed assets*. Di particolare interesse è la: ISO 15686-8: *Buildings and constructed assets — Service-life planning — Part 8: Reference service life and service-life estimation*. Quest'ultima definisce il concetto di vita utile di

riferimento (*Reference Service Life*) di materiali e prodotti come vita utile degli stessi in condizioni standard e la vita utile stimata (*Estimated Service Life*) come vita utile specifica di materiali e prodotti influenzata dalle condizioni ambientali e di posa in opera. Le modalità attraverso cui determinare la durata di un materiale e prodotto sono stabilite nella parte 2 della ISO 15686 che prevede un metodo fattoriale. In altre parole, per un elemento tecnico o materiale sono forniti una serie di sub fattori [34] che ne influenzano il ciclo di vita, suddivisi in:

A = qualità dei materiali

B = qualità di esecuzione

C = qualità di progettazione

D = condizioni dell'ambiente interno

E = condizioni dell'ambiente esterno

F = tipologia di utenza prevista

G = livello di manutenzione previsto

Moltiplicando i sub fattori per il valore di *Reference Service Life* di un materiale o di un elemento si ottiene la vita utile stimata.

La determinazione di ciascun sub fattore può non essere facile, pertanto è auspicabile, soprattutto nel metodo avanzato, che indicazioni sulla vita utile stimata siano fornite direttamente dai produttori e descritte all'interno delle schede tecniche di materiali e prodotti e, se possibile, nelle EPD.

In assenza di informazioni puntuali desunte dalla famiglia di standard ISO 15686 il valutatore può avvalersi di fonti (report, database, pubblicazioni, ecc.). Alcune di queste sono riportate nella bibliografia del report.

L'utilizzo di una o più fonti deve essere indicato dal valutatore in fase di contabilizzazione dell'EC. Si assume inoltre, ai fini dello studio di questa fase del manufatto edilizio, che le condizioni di installazione e di posa in opera di materiali e prodotti avvenga (o sia avvenuto) in conformità alle indicazioni del produttore e nel rispetto delle normative che ne regolano la realizzazione e l'utilizzo. Si assume inoltre che l'esposizione ad agenti esterni (ad esempio esposizione ad agenti chimici, biologici e microclimatici) sia moderata e che le operazioni di manutenzione (B2) siano condotte in conformità alle indicazioni del libretto di manutenzione e delle schede tecniche.

Non sono ammesse estensioni della durata di materiali e prodotti, rispetto a quelle stabilite dalla fonte assunta come riferimento.

Qualora il valutatore identifichi delle valide ragioni che lo portino a stimare una vita utile inferiore a quella riportata nella fonte, è ammissibile una riduzione (in anni). In questi casi si raccomanda di indicare quali sono le motivazioni che hanno portato il valutatore a tale riduzione.

Inoltre, qualora lo studio dell'EC o della Whole Life Carbon preveda un confronto tra soluzioni progettuali si raccomanda di adottare la stessa fonte dati.

In bibliografia sono riportati alcuni testi e siti dove è possibile ottenere informazioni inerenti alla durata o la vita attesa di materiali, prodotti, elementi tecnici ed elementi di impianto [35; 36; 37; 38; 39; 40; 41].

Il fattore di sostituzione (*Replacement Factor*) si ottiene calcolando il numero di potenziali sostituzioni di un materiale e di un prodotto rispetto allo scenario temporale di riferimento. Il calcolo è il seguente 19:

$$[19] \quad RF_{B4-j} = \left[\frac{STR}{MEL_j} - 1 \right] \quad [n^\circ]$$

dove:

RF_{B4-j} = Replacement Factor, ovvero, il numero di sostituzioni previste per lo j-esimo materiale;

STR = Scenario Temporale di Riferimento del manufatto edilizio in anni (ad esempio 60 anni);

MEL_j = durata stimata in anni del materiale

La formula prevede di ridurre il risultato di 1, per non conteggiare due volte la produzione, il trasporto e la posa in opera iniziale, ovvero, la somma delle fasi comprese tra A1 e A5.

Il risultato, in alcuni casi, richiede di essere arrotondato, poiché la sostituzione del materiale o del prodotto, non può essere contabilizzata in modo parziale.

Se ad esempio la vita utile di un serramento è stimata in 25 anni rispetto a uno scenario temporale di riferimento stabilito di 60 anni. Il numero di sostituzioni diventa: $(60/25) - 1 = 1,4$.

In questo caso, ai fini del calcolo delle sostituzioni è possibile adottare un duplice approccio. Il primo, prevede che il serramento sia sostituito dopo 25 anni e dopo 50 anni. Il secondo, stabilisce che non avvenga alcuna sostituzione dopo 50 anni, poiché la durata in anni del serramento dopo il secondo ciclo di sostituzione è superiore allo scenario temporale di riferimento del manufatto edilizio di 15 anni.

In fase di valutazione è dunque possibile individuare un “periodo di sospensione” entro il quale si stabilisce che una sostituzione non sia più giustificabile. Più precisamente si raccomanda quanto segue:

1. Nel caso la sostituzione di un materiale o di un elemento (tecnico o di impianto) sia motivata dal rispetto di requisiti di sicurezza, di comfort e di stabilità del manufatto, non si applica alcun periodo di sospensione; il fattore di sostituzione verrà dunque calcolato con un arrotondamento in eccesso. Nel caso dell'esempio soprariportato, significa che il serramento sarà sostituito due volte;
2. Nel caso la sostituzione di un materiale o di un elemento (tecnico o di impianto) sia dovuta a un'obsolescenza funzionale che non pregiudica le condizioni di sicurezza, comfort e stabilità del manufatto, si applica un periodo di sospensione pari a 1/3 della durata stimata del ciclo di vita del materiale o dell'elemento tecnico.

Con riferimento alla finestra, significa che il periodo di sospensione si ottiene come segue:

$$25 \text{ anni} / 3 = 8,3 \text{ anni}$$

Questo significa che rispetto allo scenario temporale di riferimento il periodo nel quale è presumibile non avvengano più sostituzioni è compreso tra l'anno 60 e l'anno 52 (anno della seconda sostituzione).

Eventuali variazioni nel calcolo del periodo di sospensione dovranno sempre essere indicate e giustificate dal valutatore.

8.3.1 Sostituzione: Metodo BASE

Il metodo base prevede di determinare le potenziali emissioni di CO₂ equivalente associate al numero di sostituzioni stimate di: materiali, prodotti, elementi tecnici e di impianto, calcolate rispetto allo scenario temporale di riferimento.

La procedura prevede 2 Step sequenziali di calcolo dell'EC_{B4} della fase di sostituzione.

Step 1_Determinazione della durata dei materiali, dei prodotti e degli elementi tecnici e di impianto

La prima operazione da svolgere prevede che vengano associate ai materiali e ai prodotti, oppure agli elementi tecnici e di impianto, delle durate espresse in numero di anni. Tali valori sono, ad esempio, desumibili da banche dati [37; 38; 39; 40; 41].

La determinazione della durata deve riguardare i materiali e gli elementi oggetto di studio, in conformità alle indicazioni di cui al capitolo 5.

Step 2_Calcolo dell'EC_{B4} di materiali ed elementi

La contabilizzazione dell'EC della fase di sostituzione (B4) avviene:

1. sommando le emissioni di CO₂ equivalenti comprese tra A1 e C4 (come indicato nel paragrafo 8.3) associate a un materiale e/o a un elemento tecnico o di impianto, che si prevede di sostituire rispetto allo scenario temporale di riferimento;
2. moltiplicando la somma delle emissioni di CO₂ equivalenti (A1-C4) per il fattore di sostituzione associato al materiale o all'elemento tecnico/impianto.

L'EC può essere determinata con la seguente formula 20:

$$[20] EC_{B4} = \sum_{j=1}^n [(EC_{A1-A3-j} + EC_{A4-A5-j} + EC_{C2-C4-j}) * RF_{B4-j}] \quad [kg CO_2 eq]$$

Si noti che ai fini della determinazione dell'EC le quantità di materiali e prodotti di cui alle fasi A1-A5 sono da riferire a valori *Bill-of-Quantities* (ovvero materiali e prodotti in ingresso nel cantiere), mentre l'EC compresa nelle fasi C2-C4 è da riferire a valori *design-as-Built* (ovvero materiali e prodotti effettivamente impiegati). Nel metodo BASE i valori *Bill-of-Quantities* o *Design-as-Built* possono essere determinati utilizzando il fattore correttivo di produzione, descritto nel capitolo 6.

L'EC_{C1}, ovvero, le emissioni di CO₂ equivalente associate alla fase di demolizione/decostruzione non sono considerate ai fini del calcolo della EC_{B4}, poiché sono convenzionalmente associate alla demolizione del manufatto e non alla rimozione di alcune sue parti.

La distinzione tra *Bill-of-Quantities* e *Design-as-Built* non si applica agli elementi impianto e di servizio, poiché si presume che non si generino rifiuti associati ai processi di costruzione in fase di sostituzione.

Come precedentemente accennato, indicazioni specifiche inerenti le modalità di contabilizzazione dell'EC degli elementi di impianto e di servizio sono disponibili nel capitolo 12.

Qualora il valutatore, in relazione alla disponibilità di dati e di informazioni, non sia in grado di contabilizzare l'EC delle fasi comprese tra A4-A5 e di C2-C4, è ammissibile che il calcolo dell'EC_{B4} consideri le sole fasi A1-A3, in analogia con il concetto di ambito minimo di applicazione, illustrato nel capitolo 5. Inoltre, in caso di limitata disponibilità di informazioni inerenti la durata stimata di materiali, prodotti ed elementi tecnici, si possono adottare i valori illustrati in Tabella 8.3.

Natura del componente	Scenario temporale di riferimento	Esempi
<ol style="list-style-type: none"> Fornisce stabilità strutturale Difficile da sostituire Guasto non rilevabile mediante le normali operazioni di manutenzione 	50 anni	<ul style="list-style-type: none"> Pareti portanti Membrane poste al di sotto delle strutture portanti Tubazioni interrato Tiranti posti dietro la struttura portante
<ol style="list-style-type: none"> Moderatamente difficile da sostituire Guasto non rilevabile durante l'uso quotidiano del manufatto edilizio 	15 anni	<ul style="list-style-type: none"> Copertura del manufatto edilizio Sigillanti, guarnizioni e profilati
<ol style="list-style-type: none"> Facile da sostituire Guasti visibili 	5 anni	<ul style="list-style-type: none"> Rivestimenti e rifiniture Grondaie

Tabella 8.3 – Durata stimata di materiali, prodotti ed elementi tecnici nel ciclo di vita di un manufatto edilizio.

Nota. Come già illustrato, questo report raccomanda che la componente biogenica dell'EC sia valutata a parte nelle fasi comprese tra A1 e C4, e che gli eventuali vantaggi derivanti dalla quantità di CO₂ stoccata siano oggetto di studio nella fase D. Tale assunzione è da considerare valida anche per la fase B4.

8.3.2 Sostituzione: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO si riferisce alla progettazione esecutiva o alla programmazione di operazioni di manutenzione e prevede il coinvolgimento dell'impresa appaltatrice (o esecutrice) dei lavori, nonché un elevato livello di sviluppo dei dati disponibili. Più precisamente, è possibile caratterizzare a fase di sostituzione (B4), a fronte dell'elaborazione di un piano di manutenzione (o altro documento tecnico) – in cui si evidenziano con precisione i materiali, i prodotti e gli elementi tecnici e di impianto che si prevede di sostituire nel manufatto edilizio, rispetto allo scenario temporale di riferimento.

Se i materiali e i prodotti selezionati per la realizzazione del manufatto edilizio, dispongono di un EPD recante informazioni sulla fase B4, verranno

utilizzati i valori EC corrispondenti. In assenza di una EPD i valori di EC potranno essere ricavati da schede tecniche di prodotto, da informazioni rese disponibili dagli attori del processo edilizio (produttori, costruttori, ecc.) e da altre certificazioni ambientali.

Sebbene connotato da un livello superiore di dettaglio, il metodo AVANZATO non prevede una diversa modalità di contabilizzazione e di valutazione rispetto al metodo BASE. Pertanto, il calcolo dell'EC associato alle attività Sostituzione (EC_{B4}) prevede i 2 step descritti nel paragrafo 8.3.1

8.4 Determinazione dell'Embodied Carbon della fase di Ristrutturazione (B5)

La fase di ristrutturazione (B5) ha caratteristiche differenti rispetto alla fase di sostituzione (B4). Nell'ambito di questo report è da intendere come una variazione significativa delle caratteristiche morfologiche e volumetriche di un manufatto edilizio. La ristrutturazione può essere associata a una variazione della destinazione d'uso del manufatto, oppure, ad attività del processo edilizio che si svolgono al termine del ciclo di vita utile di

un manufatto (anche in anni successivi allo scenario temporale di riferimento). Inoltre, qualora le condizioni di progetto lo prevedano, la ristrutturazione può essere pianificata in un momento preciso del ciclo di vita del manufatto, in modo indipendente dallo scenario temporale di riferimento o dal ciclo di vita reale dello stesso manufatto.

Si tratta dunque di una fase in cui sarà richiesto al valutatore di distinguere tra materiali, prodotti ed elementi (tecnici e di impianto) che saranno, e non saranno, oggetto di ristrutturazione.

Una volta operata questa distinzione, indipendentemente dal metodo assunto come riferimento (BASE o AVANZATO) la fase (B5) è da considerare come un bilancio minimo ottenuto:

- dal calcolo dell'EC delle fasi A1-A5 di tutti i nuovi materiali, prodotti, elementi tecnici e di impianto che sostituiscono e integrano quelli esistenti, oppure, che ampliano la volumetria del manufatto originale (capitolo 7);
- dal calcolo dell'EC delle fasi C1-C4 dei materiali, prodotti ed elementi tecnici e di impianto che costituiscono i rifiuti del manufatto edilizio esistente (capitolo 8);
- dal calcolo dell'EC delle fasi C2-C4 dei rifiuti generati a valle delle operazioni di nuova costruzione associati ai nuovi materiali, prodotti ed elementi (capitolo 9).

Per ciascuno dei già menzionati calcoli si raccomanda di adottare le indicazioni di contabilizzazione riportate nei capitoli 6, 7, 9, 10 e 11.

Per fasi non comprese nel bilancio sopra descritto, ovvero le fasi: d'uso (B), demolizione completa del manufatto edilizio (C) e successiva circular economy (D), la valutazione può comunque essere condotta utilizzando le procedure descritte nel presente report.

9 Fine vita (C1-C2-C3-C4)

La fase di Fine Vita comprende 4 sottofasi previste nello standard UNI EN 15978:2011: demolizione (C1); trasporto dei rifiuti (C2); trattamento dei rifiuti (C3); smaltimento finale (C4).

Il termine "fine vita" fa riferimento a uno scenario potenziale di dismissione del manufatto edilizio, cui sono associati ulteriori scenari di produzione e trattamento dei rifiuti da Demolizione, e in parte di Costruzione. Tali rifiuti corrispondono ai materiali e ai prodotti effettivamente impiegati per la realizzazione del manufatto edilizio (Design-as-Built), una volta che non sono più in grado di svolgere le funzioni per cui sono stati selezionati.

9.1 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Demolizione (C1)

Il paragrafo illustra le modalità di calcolo dell'EC_{C1}, relative alle operazioni di *Demolizione* svolte in cantiere, tramite l'ausilio di attrezzature e mezzi dedicati.

Queste attività possono interessare differenti periodi temporali del ciclo di vita di un manufatto edilizio. Più precisamente, è verosimile prevedere 3 potenziali scenari:

EC_{C1DP} La *Demolizione preliminare* (DP) (vedi paragrafo 5.4 "*Tipologie di manufatti*"), si configura attraverso operazioni di rimozioni dal sito di precedenti manufatti. In questa situazione, il calcolo dell'EC si riferisce ad attività che avvengono nella fase di Costruzione (A5) ma devono essere contabilizzate nella fase C1. In altri termini, la DP si prefigura come un'anticipazione della fase C1 all'anno 0 (ossia, riferita all'anno di realizzazione del manufatto);

EC_{C1DU} La *Demolizione in fase d'Uso* (DU) (vedi capitolo 8 “Uso”), caratterizzata da attività di Manutenzione (B2), Riparazione (B3), Sostituzione (B4) e Riqualificazione (B5). Tale demolizione, è associata alla fase B del manufatto edilizio, ma viene contabilizzata in questa fase. In altre parole, la DU rappresenta un’anticipazione della fase C1 calcolata nel periodo compreso tra la costruzione (anno 0) e il termine dello scenario temporale di riferimento del manufatto;

EC_{C1DEoL} La *Demolizione End-of-Life* (DEoL) è contraddistinta da operazioni di decostruzione al termine della vita utile, o più precisamente, al termine dello scenario temporale di riferimento (C1) del manufatto edilizio.

Rispetto ai tre scenari di demolizione illustrati, per determinare un valore unitario di EC_{C1} , è necessario definire una procedura di calcolo relativa ai processi in cui si impiegano macchinari di cantiere, per svolgere le operazioni di *Demolizione*, e successivamente, sommare i singoli valori ottenuti.

Si rammenta che le operazioni di *Demolizione Preliminare* (DP) sono oggetto di valutazione nel caso in cui siano comprese nella progettazione preliminare ed esecutiva. Nei casi, invece, in cui il sito dove verrà realizzato il manufatto non richieda operazioni di demolizione preliminare, o in cui sia un ente terzo a occuparsene (ad esempio, quando la municipalità si fa carico delle attività di demolizione, bonifica, ecc.), il valore di EC sarà considerato pari a zero. Pertanto, non sarà considerato ai fini della determinazione dell’EC del processo di demolizione.

Anche la contabilizzazione dell’EC relativa alla fase d’uso C1 fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO.

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto, da EPD o altra certificazione.

Per entrambi i metodi, la procedura di calcolo per contabilizzazione delle emissioni di CO_2eq – associate alle operazioni di cantiere (C1) utilizza il medesimo iter adottato per determinare l’ EC_{A5} , caratterizzato da 5 Step e illustrato nel paragrafo 7.2. Ne discendono due formule 21, 22 di contabilizzazione delle emissioni di CO_2eq , mutuata dallo Step numero 5 della procedura di calcolo dell’ EC_{A5} :

$$[21] \quad EC_{C1DP} \triangleq EC_{C1DU} \triangleq EC_{C1DEoL} \triangleq EC_{A5} \\ = \sum \text{Emissione di } CO_2 [\text{kgCO}_2] + \\ + \text{Emissione di } CH_4 [\text{kgCO}_2eq] \\ [\text{kgCO}_2eq]$$

$$[22] \quad EC_{C1} = EC_{C1DP} + EC_{C1DU} + EC_{DEoL} \quad [\text{kgCO}_2eq]$$

dove:

\triangleq = uguale per definizione

Nel metodo BASE, le informazioni sui quantitativi di materiale e/o volumi di prodotto, da considerare nelle operazioni di demolizione, possono essere recuperate dall’abaco riportato nel paragrafo 7.2 per la contabilizzazione dell’ EC_{A5} , così come nel capitolo 8 inerente le operazioni d’uso: B2, B3, B4 e B5. Mentre, per quanto attiene il metodo AVANZATO, le informazioni sono ottenibili dal computo metrico o da altra documentazione tecnica.

9.2 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Trasporto dei rifiuti (C2)

La determinazione dell' EC_{C2} si riferisce ai processi di *Trasporto* dei materiali e dei prodotti una volta esaurito il loro ciclo di vita. Più nel dettaglio, per la fase C2 è necessario calcolare le emissioni di CO_2eq derivanti dalle diverse operazioni di trasporto di tutti i materiali e prodotti, che da qui in avanti assumono la definizione di rifiuti, verso il sito di trattamento e/o la discarica.

Lo scenario temporale di riferimento di un materiale può coincidere con lo scenario temporale identificato per il manufatto edilizio (vedi paragrafo 5.5 “*Confini temporali del processo di contabilizzazione*” – C1, oppure coincidere con altre fasi dove si producono rifiuti: costruzione (A5), manutenzione (B2), riparazione (B3), sostituzione (B4) e/o ristrutturazione (B5).

Per quanto riguarda il sito di trattamento rifiuti, può essere inteso come un eco-centro, in cui i rifiuti confluiscono per essere selezionati e trattati al fine di essere reimmessi sul mercato (riciclo) o smaltiti (discarica).

La fase C2 può, quindi, variare a seconda di specifiche modalità smaltimento a fine vita di un determinato rifiuto. Infatti, se l'eco-centro coincide con la discarica, l' EC_{C2} si riferisce alle operazioni di trasferimento dal cantiere allo stesso sito. In alternativa, se il sito di trattamento dei rifiuti (C3) non coincide con la discarica (C4), sarà necessario calcolare l' EC_{C2} sommando le operazioni di trasporto dal cantiere verso l'eco-centro, e dall'eco-centro verso la discarica.

Per il metodo BASE e il metodo AVANZATO, la procedura di calcolo per contabilizzazione le emissioni di CO_2eq – associate alle operazioni

di *Trasporto* (C2) – si avvale del medesimo iter illustrato nel paragrafo 7.1 per determinare l' EC_{A4} . Ne consegue la formula 23, per determinare l' EC_{C2} , mutuata dallo Step 7 della procedura di calcolo dell' EC_{A4} :

$$[23] EC_{C2} \triangleq EC_{A4} = \sum F[kWh][l][kg] * * gW \left[\frac{kgCO_2eq}{kWh} \right] \left[\frac{kgCO_2eq}{l} \right] \left[\frac{kgCO_2eq}{kg} \right] [kgCO_2eq]$$

dove:

\triangleq = uguale per definizione

F = consumo del mezzo (può essere espresso in chilowattora [kWh], litri [l] o chilogrammi [kg], a seconda della tipologia di combustibile impiegato dal mezzo di trasporto

gW = coefficiente di emissione diretta e indiretta specifico del processo di trasporto

Per il metodo BASE, in linea con le indicazioni bibliografiche [9], in mancanza di informazioni di progetto, è possibile stimare una distanza complessiva, per le operazioni di Trasporto, di 50 km. Tale valore è applicabile a ciascuno degli scenari di demolizione descritti nel paragrafo 9.1.

9.3 Determinazione dell'Embodied Carbon del processo di Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)

Il fine vita dei materiali rappresenta una delle sezioni più complesse della valutazione dell'EC di un manufatto edilizio, poiché le emissioni sono stimate su uno scenario temporale molto distante dalle attività di progettazione. In altri termini, è necessario effettuare delle previsioni sulle emissioni che saranno generate a fine vita del manufatto e, quindi, in un

futuro lontano dal periodo di realizzazione dello studio. Di conseguenza, è plausibile che le modalità di trattamento dei rifiuti o il loro smaltimento in discarica con il tempo possano cambiare, tanto da influenzare i fattori di emissioni ad essi associati.

La contabilizzazione dell' EC_{C3+C4} richiede dunque di sviluppare una serie di scenari di gestione del fine vita dei materiali che costituiscono il manufatto edilizio. Per questo motivo, prima di procedere con la definizione della modalità di calcolo della EC, è necessario stabilire i *tassi di recupero* (%) rispetto ai quali impostare i differenti scenari di trattamento dei materiali, una volta che saranno classificati come rifiuti.

Nell'ambito del report si è deciso di riferire la valutazione dell' EC_{C3+C4} a due scenari:

1. scenario 100%, in cui il 100% dei rifiuti – generati nelle fasi che caratterizzano il ciclo di vita del manufatto edilizio – è destinato allo smaltimento in discarica;
2. scenario 70-30% o 2030, in cui il 70% dei rifiuti – generati nelle fasi che caratterizzano il ciclo di vita del manufatto edilizio – è sottoposto a processi di recupero e il restante 30% è destinato allo smaltimento in discarica. Tale scenario rispetta gli obiettivi indicati nelle direttive dell'Unione Europea per il 2030 [42].

Ai due scenari appena descritti è possibile che siano aggiunti ulteriori scenari, riguardanti alcune categorie di rifiuti (ad esempio per l'acciaio il tasso di recupero che può essere indicato è pari al 90%). Tale determinazione è ammissibile, purché opportunamente giustificata. Inoltre, la modalità di calcolo del tasso di recupero è suscettibile di aggiornamenti e integrazioni che dovranno rispettare alcuni requisiti stabiliti dalla normativa in via di definizione e sviluppo [43].

In relazione alla tipologia di informazioni considerate,

si determinano differenti tipologie di rifiuti – qui connotati con la lettera “W” di *waste* – relativi ad altrettante fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio:

$EC_{C3+C4CW}$ Costituisce la quota parte di EC delle fasi C3+C4 relativa al processo di **Costruzione Waste** (CW), ovvero i rifiuti prodotti durante le attività di costruzione del manufatto edilizio. Come specificato nel paragrafo 7.2.3, i rifiuti da costruzione, ai fini della determinazione dell'EC, si riferiscono a operazioni che avvengono nella fase A5 ma che devono essere contabilizzate nella fase C3+C4. Essi rappresentano un'anticipazione della fase C3+C4 calcolata all'anno 0 (anno di costruzione del manufatto edilizio);

$EC_{C3+C4RW}$ Costituisce la quota parte di EC delle fasi C3+C4 inerente il processo di **Replacement Waste** (RW). Con RW si intendono tutti quei prodotti che sono sostituiti in seguito a operazioni di Manutenzione (B2), Riparazione (B3), Sostituzione (B4) e Riquilificazione (B5). Tali rifiuti, come illustrato nei paragrafi 8.2, 8.3 e 8.4, sono associati alla fase B ma devono essere contabilizzati in questa fase. Rappresentano altresì un'anticipazione della fase C3+C4 calcolata nel periodo compreso tra la costruzione (anno 0) e il termine dello scenario temporale di riferimento del manufatto edilizio (es. 60 anni).

$EC_{C3+C4DW}$ Costituisce la quota parte di EC delle fasi C3+C4 inerente il processo di **Demolition Waste** (DW), ossia, la quantità di rifiuti prodotti in seguito alle operazioni di Demolizione (C1) (vedi paragrafo 9.1).

In quest'ottica, al fine di determinare un valore unitario di EC_{C3+C4} , è necessario applicare la procedura di calcolo di seguito descritta 24:

$$[24] EC_{C3+C4} = EC_{C3+C4CW} + EC_{C3+C4RW} + EC_{C3+C4DW} [kgCO_2eq]$$

Così come previsto per le altre fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio anche la contabilizzazione dell' EC_{C3+C4} relativa alle attività di Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale fa riferimento al metodo BASE e al metodo AVANZATO:

1. il metodo BASE è associato alla fase di progettazione preliminare del manufatto edilizio e si basa su informazioni generiche;
2. Il metodo AVANZATO si applica alla fase di progettazione esecutiva e/o realizzativa del manufatto edilizio e si basa su dati ricavati da schede tecniche di prodotto, da EPD, o altra certificazione.

Per entrambi i metodi, la procedura di calcolo per contabilizzazione le emissioni di CO_2eq – dei rifiuti prodotti – può avvalersi di fattori di emissione specifica, ricavati da banche dati o altre fonti. La Tabella 9.1 riporta i fattori di emissione specifica dei rifiuti da costruzione e

demolizione presenti nel database BEIS, sviluppato dal *Department for Business, Energy & Industrial Strategy* [44]. La tabella illustra i fattori di emissione specifica associati a differenti modalità di trattamento dei rifiuti così classificati:

- **operazioni di riciclaggio aperto** (open-loop recycling) – dove il rifiuto viene destinato a un processo di riciclaggio analogo a quello che lo ha generato (è il caso, ad esempio, di molte leghe di materiali ferrosi e non ferrosi);
- **operazioni di riciclaggio chiuso** (closed-loop recycling) – dove il rifiuto viene destinato a un processo diverso da quello che lo ha generato (è il caso di alcune tipologie di plastiche, che spesso sono sottoposte a processi di trasformazione e riciclaggio per la produzione di nuove materie con caratteristiche prestazionali solitamente inferiori a quelle che avevano le materie di origine);
- **incenerimento** – (Combustion);
- **compostaggio** – (Composting);
- **discarica** – (Landfill);

Tali fattori, espressi in $kgCO_2eq/t$ di rifiuto, sono suddivisi in differenti categorie: prodotti, materiali, servizi, mezzi, ecc; a loro volta, queste categorie, sono ulteriormente

Tipologia di rifiuto	Unità di misura	Riuso	Riciclo Open-loop	Riciclo Closed-loop	Combustione	Compostaggio	Discarica
		kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
Aggregati	t	/	0,989	0,989	/	/	1,239
Asbesto		/	/	/	/	/	5,918
Asfalto		/	0,989	0,989	/	/	1,239
Calcestruzzo		/	0,989	0,989	/	/	1,239
Cartongesso		/	/	21,294	/	/	71,950
Gomma		/	/	21,294	/	/	/
Isolanti		/	/	0,989	/	/	1,239

Tipologia di rifiuto	Unità di misura	Riuso	Riciclo Open-loop	Riciclo Closed-loop	Combustione	Compostaggio	Discarica
		kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
Legno	t	/	/	/	/	/	/
Mattoni/Laterizi		/	0,989	/	/	/	1,239
Metalli		/	/	0,989	/	/	1,264
Oli minerali		/	/	21,294	21,294	/	/
Terreni		/	/	0,989	/	/	17,583
Vetro		/	21,294	21,294	21,294	/	8,902

Tabella 9.1 – Fattori di emissione specifica dei rifiuti da costruzione presenti nel database BEIS [44].

suddivise per Emission Scope 1, 2 e 3, così come descrive il **GreenHouse Gas Protocol** [16]. In relazione ai rifiuti da costruzione e demolizione, e alle modalità di smaltimento a fine vita, i fattori di emissione specifica fanno riferimento alle emissioni **Scope 3**. Si segnala che i fattori di emissione specifica per i prodotti in legno e a base legno non sono definiti nella tabella 9.1, poiché oggetto di approfondimento nel BOX 5.

Nota: i dati presenti sul database BEIS sono elaborati come somma delle fasi C2 (Trasporto rifiuti), C3 (Trattamento rifiuti) e C4 (Smaltimento finale). Tuttavia, il contributo della fase C2 è stimato per distanze inferiori a 10 km. La quota parte C2 può quindi essere considerata trascurabile nei valori proposti dalla tabella 9.1 per le fasi C3 e C4.

È infine opportuno ricordare che per entrambi i metodi BASE e AVANZATO, le informazioni sui quantitativi di rifiuti prodotti dalle attività di demolizione del manufatto edilizio da considerare nelle operazioni di Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale, possono essere desunte dall'elenco dei rifiuti stilato nel paragrafo 9.1 per la contabilizzazione dell'EC_{C1}.

9.3.1 Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale: Metodo BASE

Il metodo BASE prevede di determinare le potenziali emissioni di CO₂ equivalente associate al Trattamento

dei rifiuti e allo Smaltimento finale.

Il metodo è utile nell'elaborazione di una stima iniziale delle emissioni ma anche nella valutazione di scenari alternativi di gestione dei rifiuti.

La procedura prevede 2 step sequenziali per poter calcolare l'EC_{C3+C4}.

Step 1_ Identificazione del quantitativo di rifiuto e del corrispondente tasso di recupero

La prima operazione per la determinazione dell'EC_{C3+C4} prevede che sia identificato il j-esimo quantitativo di rifiuto, suddiviso per categorie (es. calcestruzzo, laterizio, legno, ecc.) e, infine, moltiplicato per il tasso di recupero (%). Di conseguenza, la procedura di calcolo restituisce n-quantità di materiale associate alle differenti categorie e diversificate a seconda del tasso di recupero. Si precisa che lo stesso j-esimo rifiuto è oggetto di studio secondo i due scenari precedentemente descritti.

Le formule 25, 26a e 26b illustrano il calcolo per lo scenario 100% e 70-30% dell'j-esimo rifiuto:

$$[25]Scenario100\%j_{esimo}rifiuto = j_{esimo}rifiuto[kg] * 1[kg]$$

$$[26a]Scenario70 - 30\%j_{esimo}rifiuto = j_{esimo}rifiuto[kg] * 0,7[kg]$$

$$[26b]Scenario70 - 30\%j_{esimo}rifiuto = j_{esimo}rifiuto[kg] * 0,3[kg]$$

Step 2_Calcolo dell' EC_{C3+C4} dell'*j*-esimo rifiuto in relazione dello scenario di smaltimento

Questa parte della procedura di calcolo prevede di moltiplicare il quantitativo di *j*-esimo rifiuto, per il fattore di emissione specifica – utilizzando i valori presenti nel database BEIS o ricavati da altre fonti (che si raccomanda sempre di citare).

Gli scenari 100% e 70-30% prevedono la valutazione delle seguenti modalità di gestione dei rifiuti: riciclaggio aperto, riciclaggio chiuso e discarica. Le formule 27 e 28, definiscono le operazioni per determinare l' EC_{C3+C4} dell'*j*-esimo materiale, in relazione allo scenario di smaltimento dei rifiuti:

$$[27] \quad EC_{C3+C4} \text{ 100\% } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto} = 100\% \text{ kg } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto} * f \text{ emissione specifica discarica}$$

[kgCO₂eq]

$$[28] \quad EC_{C3+C4} \text{ 70 - 30\% } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto} = [70\% \text{ kg } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto} * f \text{ emissione specifica riciclo}] + [30\% \text{ kg } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto} * f \text{ emissione specifica discarica}]$$

[kgCO₂eq]

Step 3_Calcolo dell' EC_{C3+C4}

La terza parte del calcolo prevede di determinare il valore di EC_{C3+C4} come sommatoria dei singoli valori determinati per *j*-esimi rifiuti. Di seguito, si illustrano le formule 29 e 30, per determinare l' EC_{C3+C4} dei due scenari di smaltimento:

$$[29] \quad EC_{C3+C4} \text{ 100\%} = \sum_{j=1}^n EC_{C3+C4} \text{ 100\% } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto}$$

[kgCO₂eq]

$$[30] \quad EC_{C3+C4} \text{ 70 - 30\%} = \sum_{j=1}^n EC_{C3+C4} \text{ 70 - 30\% } j_{\text{esimo}} \text{ rifiuto}$$

[kgCO₂eq]

Nota: i risultati ottenuti dai due scenari devono essere restituiti in forma separata nella valutazione della Whole Life Carbon.

9.3.2 Trattamento dei rifiuti e Smaltimento finale: Metodo AVANZATO

Il metodo AVANZATO, riferito alle fasi di trattamento dei rifiuti e smaltimento finale, prevede un elevato livello di elaborazione dei dati disponibili. Più precisamente, attraverso il computo metrico o attraverso altri documenti tecnici (es. piano di demolizione e gestione dei rifiuti) è possibile determinare i possibili rifiuti prodotti e i processi inerenti le fasi C3 e C4.

Seppur con un grado di dettaglio superiore rispetto al metodo BASE, il metodo AVANZATO **non differisce** nella procedura di calcolo. Pertanto, l'elaborazione dell' EC_{C3+C4} può essere svolta mediante i 3 Step presentati nel paragrafo 9.3.1.

Se i materiali o i prodotti, selezionati per la realizzazione del manufatto edilizio, dispongono di un EPD o di altre valutazioni del ciclo di vita (es. Carbon Footprint, Product Environmental Footprint, studi LCA, ecc.) recante informazioni sulle fasi C3 e C4, è possibile utilizzare i valori riportati, eliminando, di fatto, la necessità di moltiplicare la *j*-esima quantità di rifiuto per il fattore di emissione specifica.

BOX 5: Carbon Sequestration dei rifiuti a base legno – Fine vita: CS_{C3+C4}

Il BOX 5 definisce le modalità di gestione della *Carbon Sequestration* (CS) dei prodotti a base legno una volta esaurita la loro funzione rispetto allo scenario temporale di riferimento. L'assorbimento, già contabilizzato nella fase di produzione CS_{A1-A3} del ciclo di vita del manufatto edilizio (vedi BOX 2), nella fase C richiede che venga studiato in che modo il credito di CO_2 – derivante dalla componente biogenica – sia gestito al termine del ciclo di vita di un materiale o prodotto a base legno.

Nello specifico, in analogia con la normativa UNI EN 16485:2014, per i rifiuti a base legno si possono prevedere due possibili scenari: un trasferimento della CS_{A1-A3} nella CS_{C3+C4} , qualora il rifiuto a base legno sia riutilizzato o riciclato, oppure un sostanziale azzeramento del credito, nel caso in cui il rifiuto in legno, o a base legno, sia sottoposto a incenerimento, oppure – ancora – un rilascio di emissioni di gas a effetto serra da imputare a processi di degradazione anaerobica in discarica. Più precisamente, le modalità di trattamento dei rifiuti in legno e a base legno si distinguono come segue:

- Riutilizzo. In questo caso, si considera nel modulo C3 il “trasferimento” del valore di CS, calcolata nel modulo A1-A3, nella nuova struttura;
- Riciclo. È da ritenersi un “trasferimento” nel modulo C3 come per il caso del riutilizzo. Tuttavia, è necessario calcolare un contributo addizionale di carbonio fossile, in seguito ai processi di trasformazione del rifiuto (es. triturazione di una trave in legno per realizzare dei pannelli MDF);
- Incenerimento. Si considera un’emissione in atmosfera pari alla CS_{A1-A3} , tale da azzerare il bilancio di carbonio biogenico. Ai fini della valutazione Whole Life Carbon il bilancio di carbonio è pari a 0;
- Smaltimento in discarica. Ne consegue un’emissione di CO_2 e CH_4 nel modulo C4, a causa dei processi di decomposizione del materiale.

Coerentemente all’approccio metodologico descritto nel paragrafo 9.3, si raccomanda di contabilizzare i moduli C3 e C4 insieme.

La Tabella B5.1, sulla base di alcuni documenti tecnici di riferimento [9; 45], propone i valori di emissione CS_{C3+C4} di un generico prodotto a base legno, sulla base delle differenti modalità di trattamento.

Scenario di smaltimento	Descrizione	EC_{C3-C4}
Riuso	Il materiale o prodotto mantiene invariato il credito acquisito. Nota bene: nel caso del riuso non deve essere riportato alcun dato di CS_{C3+C4} .	$(-) CS_{C3+C4} = (-) CS_{A1-A3}$
Riciclo	Il carbonio biogenico è trasferito all’utilizzo successivo, ma si rende necessario contabilizzare produzione di CO_2 a causa dei processi di trasformazione del legno. Nota bene: l’emissione di + 0,03 $kgCO_2eq/kg$ di prodotto a base legno è da considerarsi relativa ai processi di trasformazione del legno e, di conseguenza, da sottrarre al quantitativo originario di carbonio biogenico CS_{A1-A3} .	$(-) CS_{C3+C4} = (-) CS_{A1-A3} + 0,03 kgCO_2eq/kg^A$
Incenerimento per recupero energetico	Il carbonio biogenico stoccato viene rilasciato in atmosfera. Nota bene: il dato coincide con quello di CS_{A1-A3} ma il segno è opposto [+], quindi il bilancio complessivo sarà pertanto pari a 0.	$(-) CS_{C3+C4} = (-1) * (- CS_{A1-A3})$
Smaltimento in discarica con recupero di gas	Rilascio in ambiente di CO_2 e CH_4 in seguito ai naturali processi di decomposizione del materiale.	0,83 $kgCO_2eq/kg^B$
Smaltimento in discarica senza recupero di gas ^C	Rilascio in ambiente di CO_2 e CH_4 in seguito ai naturali processi di decomposizione del materiale.	2,15 $kgCO_2eq/kg$

^A Scenario di riciclo calcolato sulla base di un generico prodotto a base legno, ricavato dai documenti tecnici di riferimento [45].
^B Il valore di CO_2eq per le modalità di smaltimento in discarica con recupero di gas è stato prelevato dal database BEIS [44].
^C Le discariche più moderne hanno impianti di cattura dei gas derivanti dalla decomposizione della frazione organica.

Tabella B5.1 – Contabilizzazione dell’ EC_{C3+C4} dei rifiuti in legno o a base legno.

Se il prodotto preso in esame dispone di certificazione EPD o di altre valutazioni del ciclo di vita (es. Carbon Footprint, Product Environmental Footprint, studi LCA, ecc.), non è necessario utilizzare i valori descritti nella Tabella B5.1.

BOX 6: Carbon Uptake dei rifiuti a base cemento – Fine vita: CU_{C3+C4}

Il BOX 6 definisce le modalità di contabilizzazione della *Carbon Uptake* (CU) di rifiuti a base cemento. Sebbene l'assorbimento si verifichi in più fasi del ciclo di vita (B e C), nel BOX 6 si intende restituire le linee guida per la determinazione della CU_{C3+C4} nella fase C (Fine vita) del ciclo di vita del manufatto edilizio.

Per la contabilizzazione della CU_{B1} in fase B (Uso) si veda io BOX 3.

L'assorbimento di CO_2 , come già specificato, è un fenomeno legato al processo di carbonatazione che riguarda i prodotti a base cemento.

La procedura di calcolo per determinare la CU_{C3+C4} è applicabile a entrambi i metodi: BASE e AVANZATO ed è stata ricavata dalle indicazioni presenti nella norma BS EN 16757:2017, con particolare riferimento all'Annex BB: *CO₂ uptake by carbonation – Guidance on calculation* – e alla norma PD CEN/TR 17310:2019: *Carbonation and CO₂ uptake in concrete*.

La contabilizzazione degli assorbimenti CU_{C3+C4} è estesa oltre lo scenario temporale di riferimento (si veda paragrafo 5.5). Si suppone infatti che il prodotto a base cemento, una volta dismesso (ovvero trasformato in rifiuto e gestito nel rispetto della normativa vigente) possa continuare ad assorbire CO_2 . Il periodo massimo di carbonatazione ammissibile corrisponde alla differenza tra gli anni considerati per valutare le emissioni di CO_2 equivalente rilasciate in atmosfera (pari a 100 anni, si veda paragrafo 4.1) e gli anni stabiliti nello scenario temporale di riferimento.

Se, ad esempio, per un manufatto edilizio lo scenario temporale è pari a 60 anni, si suppone che la carbonatazione possa proseguire per altri 40 anni al massimo. Di seguito la tabella B6.1, mutuata dal paragrafo 5.5, illustra lo scenario temporale di valutazione della CU_{C3+C4} .

Si precisa che lo scenario temporale di valutazione della CU_{C3+C4} (per i manufatti edilizi con funzione strutturale) non è determinato come differenza tra l'orizzonte temporale di stima delle emissioni e il termine dello scenario di riferimento di un manufatto edilizio. Di conseguenza, il valore di 30 anni fa riferimento a testi citati nelle norme utilizzate per l'elaborazione del metodo di calcolo: BS EN 16757:2017 e PD CEN/TR 17310:2019.

Tipologia	Termine dello scenario temporale di riferimento di un manufatto edilizio	Orizzonte temporale di stima delle emissioni	Scenario temporale di valutazione della CU_{C3+C4}
Manufatti edilizi con funzioni abitativa	50 anni (minimo)	100 anni	50 anni
	60 anni (massimo)		40 anni
Manufatti edilizi con funzione strutturale	120 anni	100 anni	30 anni

Tabella B6.1 – Scenario temporale di valutazione della CU_{C3+C4}

Si noti, inoltre, che il valore di carbonatazione oltre lo scenario temporale di riferimento, non può essere superiore a 5 anni nel caso di opere temporanee. La procedura di calcolo della CU_{C3+C4} , in linea con i riferimenti normativi e alcuni studi [46; 47], può essere applicata a fronte delle comuni operazioni di demolizione delle opere in cemento. Tali modalità, siano esse finalizzate al recupero degli inerti o alla loro dismissione in discarica, prevedono di tritare il j-esimo elemento in frazioni non superiori ai 30 mm [46]. Di conseguenza, la procedura di calcolo tiene conto di un ipotetico cubo, avente lato 30 x 30 mm, per stimare il quantitativo teorico di CU_{C3+C4} .

La determinazione della CU_{C3+C4} richiede 5 Step sequenziali, applicabili senza alcun emendamento sia al metodo BASE sia al metodo AVANZATO.

Step 1_ Determinazione del volume degli elementi in cemento e del mix-design specifico.

La prima operazione della procedura di calcolo richiede di determinare il volume complessivo dei rifiuti in cemento oggetto di valutazione della CU_{C3+C4} . Tuttavia, si rende necessario separare i volumi nel caso in cui si adottino differenti tipologie di mix-design nel manufatto edilizio (es. struttura portante realizzata in CEM I, massetti realizzati in CEM II/B-V, ecc.).

Step 2_ Sottrazione del cemento carbonatato e delle frazioni minori.

La seconda operazione da svolgere, in linea con la norma PD CEN/TR 17310:2019, prevede di sottrarre dal volume totale di ogni j-esimo mix-design una frazione pari al 24% del volume. Tale operazione consente di escludere dal calcolo sia la frazione già carbonatata del cemento sia le frazioni più piccole, ovvero polveri conseguenti ai processi di triturazione del rifiuto che non contribuiscono all'assorbimento di CO_2 .

Esempio di calcolo: $1 \text{ m}^3 \text{ di CEM I} - (1 \text{ m}^3 \text{ di CEM I} * 0,24) = 0,76 \text{ m}^3$

Step 3_ Calcolo del numero teorico di cubi 30x30 mm

Il terzo Step consente di determinare il numero teorico di cubi aventi dimensione di 30x30 mm – corrispondenti alla porzione complessiva di cemento triturato – sulla base del quantitativo rimanente di j-esimo mix-design. I dati di un singolo cubetto sono riportati nella Tabella B6.2.

Lato	Area di superficie (m ²)		Volume (m ³)	
30 mm	$6 * (l^2)$	0,0054	l^3	0,000027

Tabella B6.2 – Parametri standard del teorico cubo 30x30mm.

Il calcolo del numero di cubetti in funzione del j-esimo mix design può essere svolto mediante la formula (31):

$$[31] \quad n^\circ \text{ cubi} = \frac{\text{m}^3 \text{ j-esimo mix-design}}{\text{m}^3 \text{ singolo cubetto}} \quad [n^\circ]$$

Esempio di calcolo: $0,76 \text{ m}^3 / 0,000027 \text{ m}^3 = 28.148 \text{ cubi}$

Step 4_ Calcolo della CU_{C3+C4} di un singolo cubo 30x30 mm.

Nel quarto Step della procedura di calcolo è necessario calcolare la CU_{C3+C4} di un singolo cubo 30x30 mm, attraverso la formula 32 (per le informazioni sui dati tabellari si rimanda al BOX 3):

$$[32] \quad CU_{C3+C4} \text{ singolo cubo} = ((k_j * K_{kj}) * Dc_j * A_c) * (\sqrt{t_{C3+C4}/1000}) * Utcc_j * CP_j \quad [kgCO_2eq]$$

dove:

- CU_{C3+C4} = Carbon Uptake fase C3+C4 di un singolo cubo di dimensioni 30x30mm (kgCO₂)
- k_i = fattore k dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.2) (mm/anno^{0.5})
- Kk_i = fattore Kk correttivo dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.3) (%)
- Dci = grado di carbonatazione dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.2) (%)
- A_i = area della i-esima superficie esposta (m²)
- t = scenario temporale di valutazione della CU_{C3+C4} (vedi Tabella B6.2) (anni)
- $Utcci$ = massimo assorbimento teorico di CO₂ dell'i-esimo prodotto (vedi Tabella B3.1) (kgCO₂/kg)
- CP_i = contenuto di cemento nella miscela di i-esimo prodotto (kg/m³)

Si precisa che la presente formula deve essere applicata a ogni j-esimo mix-design.

Step 5_ Calcolo della CU_{C3+C4} totale

In seguito alla determinazione della CU_{C3+C4} di ogni j-esimo mix-design, la quinta e ultima operazione della procedura di calcolo richiede di moltiplicare il valore, ottenuto dallo Step 4, di un singolo cubetto per il numero totale di cubetti aventi quel determinato mix-design e, infine, sommare tutti i valori di ogni j-esimo mix-design.

La determinazione della CU_{C3+C4} complessiva si calcola mediante la formula 33:

$$[33] \quad CU_{C3+C4} = \sum_{j=1}^n [CU_{C3+C4} \text{ } j\text{-esimo cubetto} * n^{\circ} \text{ cubi } j\text{-esimo mix-design}] + [CU_{C3+C4} \text{ } n\text{-esimo cubetto} * n^{\circ} \text{ cubi } n\text{-esimo mix-design}] \quad [kgCO_2eq]$$

Al termine della procedura di calcolo, la CU_{C3+C4} (in analogia con quanto descritto nel BOX 3) è da intendersi come un assorbimento della CO₂ presente in atmosfera e, pertanto, da contabilizzare nel bilancio Whole Life Carbon di un manufatto edilizio con segno [-].

10 Oltre il ciclo di vita (D)

La fase D è finalizzata a valutare i benefici o gli eventuali impatti ambientali associati a processi di reimpiego e/o riciclaggio di rifiuti e al recupero energetico della componente energetica di *feedstock* presente in alcuni prodotti (si veda paragrafo 4.1).

La fase D costituisce una potenziale valutazione della circolarità del manufatto edilizio, poiché si presume che alcune quantità di materiali e prodotti possano essere sottoposte a processi di trattamento, quali ad esempio il recupero e il riciclaggio, e trasformate in nuovi materiali e prodotti, con percentuali variabili di contenuto di riciclato. Gli scenari di riciclaggio sono descritti nel capitolo 9, in particolare nel paragrafo 9.3.1 e nel BOX 5.

Poiché la fase D fa riferimento a processi potenziali, che vengono valutati oltre lo scenario temporale di riferimento, non si procede con la distinzione tra metodo BASE e metodo AVANZATO. Anche in fase di progettazione esecutiva o in fase di realizzazione del manufatto è improprio stabilire che una certificazione EPD o un altro documento che valuti il profilo ambientale di un materiale o prodotto (es. Carbon Footprint, Product Environmental Footprint, studi LCA, ecc.) possa ancora essere considerata valida trascorsi 50, 60 o 120 anni.

Pertanto, è raccomandabile che la valutazione della fase D avvenga utilizzando dati generici, in virtù di alcune assunzioni, che riguardano:

1. le tecnologie di trattamento, recupero e riciclaggio;
2. le percentuali di riciclaggio medie dei rifiuti e i relativi rendimenti delle tecnologie di trattamento, recupero e riciclaggio.

Entrambi i punti si riferiscono all'anno in cui il manufatto edilizio sarà realizzato (il cosiddetto anno

0) e non all'anno in cui sarà smesso; si tratta di un modello predittivo che valuta oggi quello che accadrà al termine del ciclo di vita del manufatto edilizio.

10.1 Determinazione dell'Embodied Carbon oltre il ciclo di vita (D) del manufatto edilizio

La contabilizzazione e valutazione dell'EC del modulo D richiede di quantificare la differenza, in termini di emissioni di anidride carbonica equivalente, tra il processo di produzione di un materiale recuperato (attraverso operazioni di reimpiego, riciclo e valorizzazione termica) e la produzione di un materiale ottenuto interamente da materie prime, o realizzato secondo la pratica corrente (includendo pertanto una frazione minima di Materia Prima Seconda).

La formula 34 definisce le modalità di calcolo:

$$[34] EC_D = EC_{A1-A3} Mat_{Jrc} - EC_{A1-A3} Mat_{BAU} \quad [kgCO_2eq]$$

dove:

EC_D = valore di EC dei potenziali benefici (riduzioni di CO_2eq) o impatti (aumenti di CO_2eq) di un prodotto, oltre lo scenario temporale di riferimento utilizzato per il manufatto edilizio

$EC_{A1-3} Mat_{Jrc}$ = valore di EC dei moduli A1-A3 di un materiale o prodotto con materia prima seconda ottenuta da un processo di riciclaggio di rifiuti ($kgCO_2eq$)

$EC_{A1-3} Mat_{BAU}$ = valore di EC dei moduli A1-A3 di un materiale o prodotto *Business As Usual*, ovvero di un prodotto realizzato secondo la pratica corrente di produzione ($kgCO_2eq$)

Il valore di EC del prodotto riciclato $EC_{A1-3} Mat_{Jrc}$, così come esplicitato nel BOX 1, è determinato attraverso la formula 35:

$$[35] EC_{A1-A3} Mat_{Jrc} = \sum_{j=1}^n (1 - R_j) * EC_{Pro-j} + (R_j * EC_{Rec-j}) [kgCO_2eq]$$

dove:

$EC_{A1-A3} Mat_{Jrc}$ = Embodied Carbon del j-esimo materiale e prodotto riciclato [kgCO₂eq]

R_j = contenuto di riciclato del j-esimo materiale e prodotto [%]

E_{Pro-j} = Embodied carbon dovuta all'impiego della materia prima nel processo di produzione dello j-esimo materiale e prodotto [kgCO₂eq]

E_{Rec-j} = Embodied carbon dovuta all'impiego della materia prima seconda nel processo di produzione dello j-esimo materiale e prodotto [kgCO₂eq]

Come si evince dalla formula 35 il contenuto di riciclato non è predeterminato; può variare in relazione a condizioni geografiche (in alcune regioni i rifiuti avviati a processi di recupero sono maggiori, rispetto ad altre) e a una variabilità percentuale che riguarda i singoli materiali. In altre parole, per un medesimo materiale e prodotto è possibile prevedere diversi tassi di recupero.

Il valutatore, in assenza di indicazioni specifiche sui valori da utilizzare, può stabilire diverse percentuali, con lo scopo di delineare scenari alternativi utili a successive comparazioni.

Tali scenari dovranno essere giustificati e adeguatamente illustrati. Si raccomanda che siano corredati da note tecnico-scientifiche a supporto dell'attendibilità di ciascun scenario e da indicazioni sull'effettiva probabilità che uno

scenario possa realizzarsi.

11 Whole Life Carbon & valutazione della Circular Economy

L'obiettivo di questo capitolo è duplice. Da un lato, viene fornita una descrizione della modalità di calcolo attraverso cui determinare la Whole Life Carbon (WLC) di un manufatto edilizio. Dall'altro, si intendono fornire alcune indicazioni metodologiche per la valutazione dei potenziali benefici e dei potenziali impatti ambientali associati alla fase D. Con il termine benefici e impatti ci si riferisce a scenari che si collocano oltre il ciclo di vita del manufatto, più nello specifico, oltre lo scenario temporale assunto come riferimento.

La **Whole Life Carbon**, come illustrato in Figura 1.3 (si veda il capitolo introduttivo), prevede una valutazione comprensiva delle fasi che vanno dall'estrazione delle materie prime (A1) allo smaltimento finale (C4); fasi che si riferiscono alla complessità di materiali e prodotti utilizzati per realizzare gli elementi tecnici e gli elementi di impianto del manufatto edilizio.

La Whole Life Carbon può dunque essere determinata in quei casi in cui lo studio si connota come **Cradle to Grave** (ovvero dalla culla alla tomba).

Nei casi, invece, in cui lo studio sia **Cradle to Gate**, ovvero, riferito o alla sola produzione di materiali e prodotti, la valutazione non può assumere la denominazione di Whole Life Carbon, ma solo di EC. Ciò avviene quando il valutatore è chiamato a considerare le fasi comprese nel cosiddetto ambito minimo di applicazione (si veda paragrafo 5.1).

La distinzione appena proposta trova una giustificazione nel fatto che alcune categorie di materiali e prodotti

hanno spesso elevati valori di EC iniziali, che vengono in parte riassorbiti durante l'uso del manufatto o a valle del suo processo di demolizione. Altri materiali e prodotti hanno tassi potenziali di riciclo elevati. Altri ancora, infine, hanno valori iniziali di EC molto bassi, o addirittura negativi, ma una volta dismessi possono rilasciare gas effetto serra in grado di azzerare completamente il vantaggio ambientale iniziale. Non è dunque possibile attribuire a uno studio A1-A3 una valutazione Whole Life Carbon.

La Whole Life Carbon di un manufatto edilizio si ottiene come segue (formula 36):

$$[36] \text{WLC} = \sum_{j=1}^n \left[\text{EC}_{\text{A1-A3}} + (\text{EC}_{\text{A1-A3}} \text{Mat}_{\text{Jrc}}) + (-\text{CS}_{\text{A1-A3}}) + \text{EC}_{\text{A4}} + \text{EC}_{\text{A5}} \right] + \\ + [\text{EC}_{\text{B1}} + \text{EC}_{\text{B2-B3}} + \text{EC}_{\text{B4}} + \text{EC}_{\text{B5}}] + [\text{EC}_{\text{C1}} + \text{EC}_{\text{C2}} + \text{EC}_{\text{C3+C4}} + (\text{CS}_{\text{C3+C4}}) + \\ + (-\text{CU}_{\text{C3+C4}})] \quad [\text{kgCO}_2\text{eq}]$$

dove:

EC (da A1 a C4) = Embodied Carbon di tutti i materiali e prodotti utilizzati per la realizzazione del manufatto edilizio, contemplati nel confine del sistema;

CS (da C3 a C4) = Carbon Sequestration dei materiali e prodotti in legno o base legno utilizzati per la realizzazione del manufatto edilizio, contemplati nel confine del sistema;

CU (da C3 a C4) = Carbon Uptake dei materiali e prodotti a base cemento utilizzati per la realizzazione del manufatto edilizio, contemplati nel confine del sistema.

Si noti che l'EC_{B1} (fase d'uso del manufatto edilizio, paragrafo 8.1) contempla nel calcolo più elementi, di cui vale la pena di menzionare: 1) rivestimenti, pitture e finiture che rilasciano emissioni di CO₂ equivalente; 2) elementi tecnici a base cemento che per effetto della carbonatazione assorbono CO₂; 3) tecnologie vegetali

che assorbono CO₂ attraverso il processo di fotosintesi. EC_{B1} è pertanto il risultato di un bilancio che comprende la componente Embodied (EC), la componente Sequestration (CS) e la componente Uptake (CU).

L'applicazione della formula 36 necessita inoltre, di ulteriori precisazioni. Come illustrato nel paragrafo 9.3, l'EC a fine vita fa riferimento a fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio per le quali è difficile stabilire durante la valutazione come avverrà la sua demolizione e come saranno gestiti e trattati i corrispondenti rifiuti. In particolare, il report raccomanda l'elaborazione di almeno due potenziali scenari di smaltimento associati alle fasi C3 e C4.

Ne consegue, quindi, che **la formula 36 debba essere applicata a tutti gli scenari che saranno oggetto di studio**, restituendo così due o più valori di Whole Life Carbon.

Sempre nell'ambito della valutazione delle fasi C3 e C4 è opportuno porre, poi, una particolare attenzione ai rifiuti a base legno (CS_{C3+C4}) e ai rifiuti a base cemento (CU_{C3+C4}). Ai primi, in relazione alle modalità di gestione dei rifiuti (si veda BOX 5), è possibile associare un valore positivo (quando il legno è sottoposto a processo di digestione anaerobica con conseguenti rilasci di CO₂ e di altri gas effetto serra che superano la CO₂ biogenica stoccata nello stesso legno) o un valore negativo (nel caso in cui legno sia riciclato e/o riutilizzato). Ai secondi è associato solitamente un valore negativo (in virtù del processo di carbonatazione descritto nel BOX 6).

Un ulteriore aspetto da sottolineare riguarda il contributo in termini di EC degli elementi di Impianto e di Servizio (si veda capitolo 12), definiti anche MEP. Per questa categoria la Whole Life Carbon è bene sia contabilizzata in modo indipendente, in ragione della sua complessità metodologica e in relazione alle unità di misura e funzionali assunte come riferimento nello studio, per le quali si rimanda al paragrafo 5.6. Solo a valle di un processo di verifica della compatibilità tra unità di misura e funzionali ed eventuali criteri di normalizzazione dei risultati, è possibile sommare i valori di Whole Life Carbon relativi

a materiali e prodotti con i valori di Whole Life Carbon associati ai MEP, secondo le formule 37a e 37b:

$$[37a] \quad \mathbf{WLC \text{ tot (scenario 1) = WLC(scenario 1) + } + \mathbf{WLC_{MEP} \quad [kgCO_2eq]}$$

$$[37b] \quad \mathbf{WLC \text{ tot (scenario 2) = WLC(scenario 2) + } + \mathbf{WLC_{MEP} \quad [kgCO_2eq]}$$

La tabella 11.1 propone un sistema di contabilizzazione dei valori di EC associati a ciascuna fase del ciclo di vita di un manufatto edilizio, nonché i valori di CS e di CU. La tabella costituisce un riferimento per l'inserimento dei valori di EC, corrispondenti alle fasi del ciclo di vita del manufatto considerate.

L'organizzazione in colonne, coerente alle indicazioni dello standard ISO 15978:2011, consente al valutatore di effettuare calcoli parziali, ad esempio, sommare il totale dei valori di EC delle fasi di produzione di materiali e prodotti (A1-A3), oppure, della sola fase di trasporto (A4).

Nella prima colonna, le righe riportano le principali categorie di elementi, di cui può essere costituito il manufatto, secondo un ordine logico che parte dalle operazioni preliminari di cantiere e arriva fino all'installazione degli elementi di impianto. Tali categorie possono, in relazione alle diverse variabili che influenzano il lavoro di valutazione, essere sostituite dal valutatore con altre ritenute più idonee.

Spostando l'attenzione sulla fase C, si nota che per le sottofasi inerenti al trattamento e allo smaltimento, la tabella comprende i due scenari: il primo, stabilisce che la destinazione finale di ogni rifiuto associato a una categoria di elementi sia la discarica. Il secondo, prevede che il 70% dei rifiuti sia destinato a una qualche procedura di recupero, mentre il 30% sia avviato a discarica.

La Circular Economy, sempre in riferimento alla figura 1.3, costituisce, come già descritto, una parte del sistema di valutazione indipendente dalla Whole Life Carbon,

anche se è sulla base della Whole Life Carbon che è possibile delineare alcuni scenari di circolarità.

Il calcolo della Circular Economy è qui inteso come risultato di una procedura che contabilizza la EC delle categorie di elementi tecnici e di impianto e di servizio, studiati rispetto allo scenario temporale di riferimento del manufatto edilizio. Una volta realizzato un bilancio di EC del ciclo di vita dei materiali e dei prodotti che costituiscono le categorie studiate, è possibile calcolarne il livello di circolarità, in termini di EC risparmiata (EC_D) nel processo di produzione di nuovi e futuri materiali, ottenuti dal reimpiego dei rifiuti stimati nelle fasi C3 e C4. Più nel dettaglio, il livello di circolarità proposto è correlato alle percentuali di riciclo che si stima potranno essere raggiunte quando il manufatto sarà sottoposto a dismissione.

La valutazione della Circular Economy si completa con la determinazione dell'eventuale quota di emissioni compensate attraverso un'attività di **Off-Setting**, che può essere realizzata attraverso una pluralità di iniziative che comprendono: investimenti in progetti di produzione di energie rinnovabili, compensazione mediante interventi di forestazione, aumento delle quantità di energia rinnovabile prodotta dal manufatto (intervenendo in altre parole sulla quota di Operational Carbon) e altro ancora. Nell'ambito del processo di valutazione complessivo del bilancio di carbonio di un manufatto, si raccomanda di inserire i risultati delle operazioni di **Off-Setting** come voce della fase D, poiché non può essere associata alle altre fasi che caratterizzano il ciclo di vita del manufatto edilizio.

In ragione di quanto appena esposto, le colonne della tabella 10.1, corrispondenti alla fase oltre il ciclo di vita (D), sono dedicate all'inserimento delle informazioni corrispondenti agli scenari di circolarità e alle attività di **Off-Setting**.

La tabella prevede che le informazioni sul riciclaggio di materiali e prodotti possano essere associate alle categorie di elementi considerate nella valutazione.

ALLEGATO ALLA ROADMAP ITALIANA

Nel caso, invece, di un'attività di compensazione delle emissioni di anidride carbonica equivalente, il dato (che

dovrà essere preceduto con un segno negativo) è da riportare nell'ultima riga della tabella.

FASI DEL CICLO DI VITA DI UN MANUFATTO EDILIZIO	PRODUZIONE (A)			COSTRUZIONE (A)		USO (B)						
	Materiali e prodotti A1-A3	Materiali e prodotti riciclati A1-A3	Carbon Sequestration (A1-A3)	Trasporto al cantiere A4	Costruzione A5	Uso B1	Manutenzione B2	Riparazione B3	Sostituzione B4	Ristrutturazione B5	Carbon Uptake (B)	Carbon Sequestration (B)
	ECA1-A3	ECA1-A3+c	CSA1-A3	ECA4	ECA6	ECB1	ECB2*	ECB3*	ECB4	ECB5	CUb1	CO2_Sb1
Unità di misura	kgCO2eq	kgCO2eq	(-) kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	(-) kgCO2eq	(-) kgCO2eq
Scenario temporale di riferimento (anni)	0	0	0	0	0	0 - n	0 - n	0 - n	0 - n	0	0 - n	0 - n
n - termine scenario temporale di riferimento (es. 50, 60, 100 anni, ecc.)												
1 - orizzonte temporale di valutazione della CLCC												
- Demolizioni preliminari												
01 Opere temporanee				0	0							
02 Preparazione del sito	0	0	0	0	0							
11 Struttura fondazione	0	0	0	0	0							
12 Struttura elevazione	0	0	0	0	0							
13 Struttura contenimento	0	0	0	0	0							
21 Chiusura Pareti perimetrali verticali	0	0	0	0	0							
22 Chiusura Solai	0	0	0	0	0							
23 Chiusura Coperture	0	0	0	0	0							
24 Chiusura Semammenti	0	0	0	0	0							
25 Chiusura Scale e rampe	0	0	0	0	0							
31 Partizione interna Pareti int. verticali	0	0	0	0	0							
32 Partizione interna Pareti int. verticali	0	0	0	0	0							
33 Partizione interna Solai e soppalchi	0	0	0	0	0							
34 Partizione interna Semammenti	0	0	0	0	0							
35 Partizione interna Elementi di protezione	0	0	0	0	0							
36 Partizione interna Scale e rampe	0	0	0	0	0							
41 Partizione esterna Elementi di protezione/separazione	0	0	0	0	0							
42 Partizione esterna Balconi logge e passerelle	0	0	0	0	0							
43 Partizione esterna Scale e rampe	0	0	0	0	0							
5 Impianti di fornitura servizi	0	0	0	0	0							
6 Manufatti edili prefabbricati	0	0	0	0	0							
7 Operazioni su edifici esistenti	0	0	0	0	0							
8 Operazioni esterne	0	0	0	0	0							
- Misure di compensazione												
TOTALE DELLE SINGOLE FASI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON (scenario 100%)	0											
VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON (scenario 70%-30%)	0											
VALUTAZIONE CIRCULAR ECONOMY	0											

FASI DEL CICLO DI VITA DI UN MANUFATTO EDILIZIO	FINE VITA (C)										DA FINE IL CICLO DI VITA (D)			
	Demolizione			Trasporto dei rifiuti C2	Trattamento dei rifiuti e Smaltimento Finale C3+C4						Carbon Sequestration C3+C4	Carbon Uptake C3+e4	Benefici o impatti dei materiali e prodotti D	Carbon Off-Setting D
	ECcDP	ECcDU	ECcDL	ECcT	scenario 100% ECc3+e4W 100	scenario 70-30 ECc3+e4W 70-30	scenario 100% ECc3+e4W 100	scenario 70-30 ECc3+e4W 70-30	scenario 100% ECc3+e4W 100	scenario 70-30 ECc3+e4W 70-30	C3+C4 C3+C4	CUc3+e4	ECO	CO2_D
Unità di misura	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	kgCO2eq	(-) (-) kgCO2eq	(-) kgCO2eq	(+) (-) kgCO2eq	(-) kgCO2eq
Scenario temporale di riferimento (anni)	0	0 - n	n	n	0	0	0 - n	0 - n	n	n	n	n - l	0	0
n - termine scenario temporale di riferimento (es. 50, 60, 100 anni, ecc.)														
1 - orizzonte temporale di valutazione della CLCC														
- Demolizioni preliminari	0			0	0	0					0	0	0	
01 Opere temporanee				0										
02 Preparazione del sito														
11 Struttura fondazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12 Struttura elevazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13 Struttura contenimento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21 Chiusura Pareti perimetrali verticali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22 Chiusura Solai	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23 Chiusura Coperture	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24 Chiusura Semammenti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25 Chiusura Scale e rampe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31 Partizione interna Pareti int. verticali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
32 Partizione interna Pareti int. verticali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33 Partizione interna Solai e soppalchi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
34 Partizione interna Semammenti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35 Partizione interna Elementi di protezione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36 Partizione interna Scale e rampe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41 Partizione esterna Elementi di protezione/separazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42 Partizione esterna Balconi logge e passerelle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43 Partizione esterna Scale e rampe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5 Impianti di fornitura servizi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6 Manufatti edili prefabbricati	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7 Operazioni su edifici esistenti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8 Operazioni esterne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
- Misure di compensazione														
TOTALE DELLE SINGOLE FASI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON (scenario 100%)	0													
VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON (scenario 70%-30%)	0													
VALUTAZIONE CIRCULAR ECONOMY	0													

Tabella 11.1 – Quadro di sintesi di contabilizzazione e valutazione dell'EC di un manufatto edilizio.

**BOX 7: Carbon Off-Setting tramite attività di compensazione della CO₂ con vegetazione.
Fase d'Uso (B1) - CO_S_{B1} – Fase (D) - CO_S_D**

Il BOX 7 definisce le modalità di contabilizzazione delle attività di *Carbon Off-Setting* (CO_S), o compensazione della CO₂, tramite la vegetazione. Un'attività di compensazione comprende misure di afforestazione (conversione di siti con differente uso del suolo a nuove foreste) o riforestazione (recupero di terreni classificati come foreste ma attualmente in degrado). Le soluzioni vegetate – conosciute anche con il termine inglese di *Nature Based Solution* (NBS) – possono riguardare installazioni *in-site*, ovvero nell'area dove sorge il manufatto edilizio, oppure, *off-site*, ovvero in aree esterne a quella dove sorge il manufatto.

Più precisamente, se l'installazione avviene *in-site*, attraverso soluzioni quali: tetti verdi (green roofs), pareti vegetate (LWS) e giardini di pertinenza del manufatto, la CO_S può essere calcolata come parte integrante del ciclo di vita dello stesso manufatto ed essere contabilizzata nel modulo B1 (Uso) (vedi paragrafo 8.1). Se, invece, il progetto mira a una compensazione della CO₂ *off-site*, tramite ad esempio il finanziamento di attività di piantumazione, la CO_S deve essere calcolata nel modulo D (vedi paragrafo 10.1). Questo tipo di compensazione – in linea con la definizione Whole Life Carbon [1; 2] – è da considerare come un'ultima opportunità, per ottenere la neutralità carbonica del manufatto e, pertanto, richiede di essere contabilizzata in modo indipendente.

In entrambi gli scenari di compensazione – CO_S_{B1} e CO_S_D – la metodologia di contabilizzazione è la stessa e determinabile attraverso strumenti che consentono di caratterizzare con una precisione crescente il dato di *Carbon Off-Setting*.

Il primo strumento è BENEFITS “Valutazione dei benefici ecosistemici dell'infrastruttura”, sviluppato nell'ambito del progetto REBUS (REnovation of public Buildings and Urban Spaces) [48]. Il foglio di calcolo consente anche di stimare il potenziale abbattimento di inquinanti atmosferici quali: SO_x, NO_x, O₃, PM10 e PM2,5.

I dati relativi alle diverse specie vegetali sono stati ricavati dal progetto “Qualiviva” [49], finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF). REBUS ha messo a disposizione delle schede tecniche, che descrivono le caratteristiche delle specie vegetali, in cui è possibile comprendere i pro e i contro dell'applicazione di una determinata specie e la sua potenziale capacità di fissazione della CO₂. BENEFITS restituisce le informazioni delle comuni specie vegetali autoctone, non è pertanto da ritenere omnicomprensivo di tutte le specie potenzialmente impiegabili, sia in ambiente *in-site* o *off-site*; inoltre, non sono presenti le informazioni sugli arbusti di piccola/media taglia.

Qualora, quindi, il progetto del manufatto edilizio preveda l'integrazione di un tetto verde o di una parete vegetata è necessario attingere a dati di letteratura. Un recente studio [50] ha stabilito che un tetto verde estensivo, dotato di impianto di irrigazione, è in grado di assorbire 2,5 kgCO₂m²/anno (valore medio). Una prestazione che è simile nel caso di una *Living Wall System* (LWS), con irrigazione controllata. Il Green Building Council UK ha, infatti, stabilito un valore di fissazione pari a 2,0 kgCO₂m²/anno.

Un secondo strumento di contabilizzazione si basa sull'impiego delle equazioni allometriche [51]. Si tratta di un modello predittivo semplificato che consente di valutare il potenziale assorbimento del carbonio da parte della biomassa secca, in relazione a due variabili: specie vegetale e diametro del fusto (e di conseguenza l'età). Per allometria, in biologia, si intende l'accrescimento relativo di un organo, o di una parte di un organismo, rispetto a tutto il corpo. In riferimento al mondo vegetale, il modello di regressione utilizzato è il seguente (39):

$$[39] \quad M = a * D^b \quad [kg]$$

dove:

M= massa totale della sostanza secca presente nella specie arborea (kg)

D= diametro del fusto misurato a 1,3-1,4 m (cm)

a= coefficiente di scala (valore tabellare)

b= esponente di scala (valore tabellare)

In bibliografia [52; 53; 54] è riportato un elenco non esaustivo di pubblicazioni che consentono di determinare i coefficienti allometrici per diverse specie vegetali.

Ne consegue che il valore CO_S, sia esso riferito alla fase B1 o alla fase D, può essere determinato moltiplicando i kg di massa totale della sostanza secca per il contenuto di CO₂ presente nel legno. È noto infatti che la biomassa legnosa contiene in media il 50% di carbonio (C) con peso atomico 12. Pertanto, il rapporto che lega il carbonio con l'anidride carbonica (CO₂), avente peso molecolare pari a 44, è di 44/12. Considerando, ad esempio, 1 kg di biomassa secca, il valore di CO₂, fissata all'interno della specie vegetale, si ottiene moltiplicando il contenuto di carbonio (0,5 kg) per il rapporto tra C e CO₂ (44/12), ottenendo così un valore di 1,83 kgCO₂. La formula 40 restituisce la modalità di calcolo per determinare la CO_{S_{B1}} e la CO_{S_D}:

$$[40] \quad CO_{S_{B1}} \triangleq CO_{S_D} = M * 1,83 \quad [kgCO_2]$$

dove:

\triangleq = uguale per definizione

M= massa totale della sostanza secca presente nella specie arborea (kg)

Si precisa che il valore ottenuto tramite la formula 40 è da contabilizzare con segno negativo (-). Infine, come ulteriore strumento di contabilizzazione on line, vale la pena di citare MyTree, elaborato da USDA Forest Service, capace di stimare gli assorbimenti di CO₂ di molteplici specie arboree [55]. MyTree consente di calcolare i potenziali benefici di un determinato albero, inserendo informazioni sulla sua posizione e dimensione.

12 Impianti e servizi – MEP

La valutazione dell'EC e della Whole Life Carbon di alcune tipologie di elementi, che possono essere previsti in progetto e utilizzati nella realizzazione di un manufatto edilizio, richiede un approfondimento dedicato agli *Impianti e Servizi*.

Con il termine *Impianti e Servizi*, si intende la categoria di elementi inclusi nella classe di unità tecnologica 5) Impianti di fornitura servizi, che comprendono (elenco non esaustivo): la climatizzazione; la ventilazione meccanica controllata; la produzione di energia rinnovabile in loco. Nell'ambito di questo report gli *Impianti e Servizi*, assumono anche la denominazione di MEP – acronimo inglese di *Mechanical, Electrical and Plumbing*. L'acronimo MEP è indicato in alcuni standard e documenti tecnici, impiegati come riferimento per definire la metodologia di contabilizzazione dell'EC; si è pertanto deciso di adottarlo anche in questo report, trattandosi di un termine in grado di sintetizzare gli elementi di impianto normalmente utilizzati in un manufatto edilizio.

Alcuni studi condotti evidenziano che i MEP possono contribuire dal 2% al 27% delle emissioni di carbonio [56] per manufatti di nuova costruzione. Nel caso invece di ristrutturazioni, è possibile stimare un

contributo del 75% sull'EC totale [57].

Una particolare attenzione deve, poi, essere posta ai gas refrigeranti (impiegati nei sistemi di riscaldamento e raffrescamento), poiché possono contribuire significativamente ad aumentare le emissioni di gas a effetto serra da parte dei MEP [58].

12.1 Fasi del ciclo di vita

La metodologia di calcolo delle emissioni associate ai MEP, in accordo con i principali riferimenti normativi e tecnici: UNI EN 15978:2011 e il report tecnico TM65 (2021) [31], è strutturata secondo fasi del ciclo di vita (A-D). Nello specifico, l'EC dei MEP può essere contabilizzata nelle fasi: A1-A3 (Produzione), A4-A5 (Costruzione), B1-B5 (Uso*) e C1-C4 (Fine Vita).

* **Nota:** in riferimento alla fase B1-B5 (uso), le emissioni di carbonio equivalente sono riferite alle operazioni di manutenzione, riparazione e sostituzione; pertanto, non fanno riferimento al fabbisogno energetico per il funzionamento dell'impianto e, di conseguenza, alla Operational Carbon.

12.2 Determinazione dell'Embodied Carbon di Impianti e Servizi – MEP

Come definito nel paragrafo 5.2, anche per i MEP, il

calcolo dell'EC è strutturato secondo due metodi: BASE e AVANZATO.

Per entrambi i metodi, si prevede di utilizzare fattori correttivi (*buffer factor*), finalizzati a valutare alcune fasi del ciclo di vita dei MEP [31].

Ai fini della valutazione dell'EC e della Whole Life Carbon si raccomanda di effettuare i calcoli in modo indipendente rispetto alla contabilizzazione dell'EC del manufatto edilizio; come già descritto in precedenza, in una fase successiva i valori determinati, normalizzati rispetto all'unità funzionale (u.f.) assunta come riferimento, potranno essere sommati a quelli calcolati degli elementi tecnici che costituiscono il manufatto edilizio.

12.2.1 Impianti e Servizi – MEP: Metodo BASE

Il metodo BASE è utile all'elaborazione di una stima iniziale delle emissioni associate alla progettazione dei MEP.

Il calcolo delle emissioni con metodo BASE, a seconda delle informazioni in possesso del valutatore, può essere svolto secondo due modalità:

1. Dati Medi Generici di MEP (es. EC di una caldaia, ascensore, ecc.)

Per questa modalità non è necessario disporre delle informazioni inerenti la composizione dei materiali che costituiscono un MEP. Il valutatore, in relazione alla potenza dell'impianto analizzato, utilizza i dati presenti su banche dati (si veda paragrafo 5.7);

2. Materiali principali (*Key Materials*) che costituiscono un MEP

L'elaborazione mediante i *Key Materials* prevede due possibili scenari:

- **Le informazioni sulla composizione dei materiali di un MEP sono note.** Questo scenario prevede che si effettui un bilancio

di massa dei materiali e dei prodotti che costituiscono il MEP. L'EC dei singoli materiali è poi calcolata attraverso una banca dati (si veda paragrafo 5.7);

- **Le informazioni sulla composizione materiale del MEP non sono note.** In questo caso i dati, utili alla costruzione di un bilancio di massa, dovranno essere desunti da ricerche personali e/o studi presenti sulle piattaforme di divulgazione scientifica (es. Science Direct, MDPI, Google Scholar, Research Gate, ecc.). In seguito all'elaborazione del bilancio di massa, sarà poi possibile stimare l'EC del MEP tramite i dati medi, reperiti dalle banche dati precedentemente citate.

Infine, per entrambe le modalità è raccomandabile ipotizzare la tipologia e la quantità di refrigerante impiegato (kg), così come la vita utile del MEP (anni), al fine di valutare il possibile impatto in termini di EC, derivante dalle perdite dello stesso refrigerante nel corso della vita utile dell'impianto.

12.2.1.1 Valutazione dell'EC con metodo BASE: procedura di calcolo

La procedura di contabilizzazione dell'EC prevede 4 Step per la modalità di calcolo basata su *Dati Medi Generici* (figura 12.1) e 5 Step per la modalità riferita ai *Key Materials* (figura 12.2). Gli step – per entrambe le modalità – sono sequenziali.

Step 1_Calcolo dell'EC dei materiali che costituiscono i MEP

La prima parte del calcolo prevede che vengano identificati e quantificati i materiali e i prodotti che costituiscono un MEP. In conformità alle indicazioni della TM65, i prodotti e i componenti selezionati, ai fini del calcolo dell'EC, dovrebbero corrispondere al 95% di quelli che costituiscono un MEP; il rimanente 5% dei materiali si stabilisce sia contabilizzato come acciaio.

Successivamente, sulla base delle quantità di materiali e prodotti considerati, si procede con la determinazione dei valori di EC, adottando la medesima procedura descritta nel paragrafo 5.7. È opportuno porre una particolare attenzione alla scelta della banca dati, poiché condiziona le modalità di calcolo. Ad esempio, alcune banche dati forniscono valori aggregati delle fasi del ciclo di vita di un MEP; tali database sono utili al calcolo secondo la modalità *Dati Medi Generici*. In assenza di valori aggregati è invece necessario adottare la modalità di calcolo *Key Materials*, determinando il valore di EC per la fase A1 tramite la sommatoria dei singoli valori di EC dei materiali che costituiscono il MEP (si veda paragrafo 12.2.1).

Step 2_ Calcolo dell'EC della fase d'Uso dei materiali che costituiscono il MEP

La seconda parte del calcolo contabilizza l'EC associata alle operazioni di manutenzione (B2), riparazione (B3) e sostituzione (B4) dei materiali che costituiscono il MEP.

In analogia con la TM65, il report propone una duplice possibilità di contabilizzazione delle emissioni:

- **Dati da scheda tecnica**

Il calcolo si basa su informazioni presenti all'interno di schede tecniche e/o altri documenti messi a disposizione dal produttore che consentano di determinare con esattezza quali materiali saranno oggetto di manutenzione, riparazione e/o sostituzione, a cui saranno associati i corrispondenti valori di EC;

- **Dati stimati**

In assenza di informazioni, si procede mediante la stima dei valori di EC dei materiali oggetto di manutenzione, riparazione e/o sostituzione durante la fase d'uso del MEP. Il calcolo richiede di aumentare del 10% il valore di EC determinato nello Step 1.

Più nel dettaglio, se si adotta la modalità di calcolo *Dati Medi Generici*, l'incremento di EC del 10% è associato alle fasi A1, A2 e A3; mentre se si utilizza la modalità di calcolo *Key Materials*, l'incremento di EC del 10% è riferito alla sola fase A1.

Step 3_ Moltiplicazione del valore di EC per il fattore di scala (solo modalità *Key Materials*)

Il fattore di scala è un indice introdotto dalla TM65, che aumenta il valore di EC precedentemente determinato negli Step 1 e 2.

Tale incremento si applica solo nella modalità di calcolo *Key Materials* e intende stimare l'impatto, in termini di EC, delle fasi A2, A3, A4, C2, C3 e C4.

Il fattore di scala è compreso tra 1,3 e 1,6 così come illustrato nella Tabella 12.1. La tabella è suddivisa in tre colonne. La prima classifica gli impianti e servizi in relazione a tre livelli di complessità. La seconda riporta un elenco di impianti e servizi associati ai livelli di complessità. La terza definisce il valore di scala, che aumenta all'aumentare della complessità del MEP.

Complessità	Esempio	Fattore di scala
Bassa	Tubi, cavi, condotti, valvole, dispositivi di allarme antincendio, prese elettriche, ecc.	1,3
Media	Pompe, corpi illuminanti, radiatori, pannelli di controllo, dispositivi di regolazione dell'illuminazione, sensori, accumulatori termici, ecc.	1,4
Alta	Unità di trattamento dell'aria, pompe di calore, caldaie, unità di interfaccia termica, refrigeratori, generatori, MVHR, quadri elettrici, UPS	1,6

Tabella 12.1 – Variazione del fattore di scala in risposta alla complessità del MEP.

Step 4_Moltiplicazione del valore di EC per il fattore buffer

Questa parte della procedura di calcolo prevede che i valori di EC, calcolati secondo le due modalità: **Dati Medi Generici o Key Materials**, siano moltiplicati per un fattore – denominato buffer – pari a 1,3.

Il fattore **buffer** aumenta, quindi, del 30% il valore di EC precedentemente calcolato, come risultato di un approccio cautelativo (data la complessità degli impianti) nel sistema di contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica equivalente associate ai MEP.

Step 5_Calcolo dell'EC dovuta alla perdita di gas refrigerante

Lo Step 5 della procedura contabilizza l'EC dei MEP che necessitano l'impiego di gas refrigerante per il loro funzionamento. Tali emissioni sono associate alla perdita di gas dall'impianto e, pertanto, si considerano associate alla fase d'Uso (B1) e alla fase di Demolizione (C1).

In conformità alla TM65, il calcolo dell'EC avviene come segue:

1. Fase B1

Si determina la tipologia e la quantità utilizzata di gas refrigerante (kg) e si moltiplica la quantità per il tasso di perdita annuale (%). Il valore così ottenuto è moltiplicato per il valore di GWP del

gas refrigerante (kgCO₂eq) e per il numero di anni di vita utile del MEP (anni);

2. Fase C1

Si determina la tipologia e la quantità utilizzata di gas refrigerante (kg) e si moltiplica la quantità per il tasso di perdita a fine vita (%). Il valore ottenuto è moltiplicato per il valore di GWP del gas refrigerante (kgCO₂eq).

In ragione della complessità del calcolo, si rimanda al paragrafo 12.3 che illustra i passaggi utili alla determinazione dell'EC.

Step 6_Calcolo dell'EC totale del MEP.

La sesta e ultima parte del calcolo prevede di determinare il valore di EC del MEP, come sommatoria dei singoli valori determinati negli Step precedenti. Le Figure 12.1 e 12.2 illustrano gli Step previsti dalla procedura di calcolo.

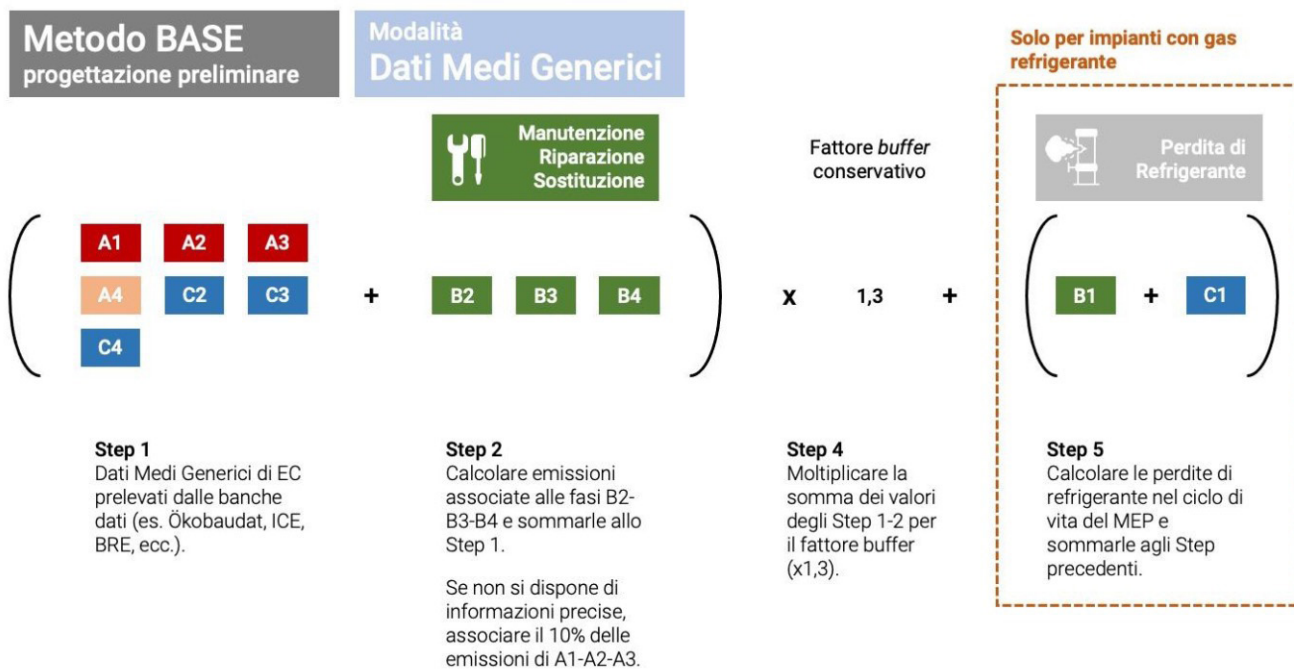


Figura 12.1 – Quadro sinottico del metodo BASE: modalità Dati Medi Generici.

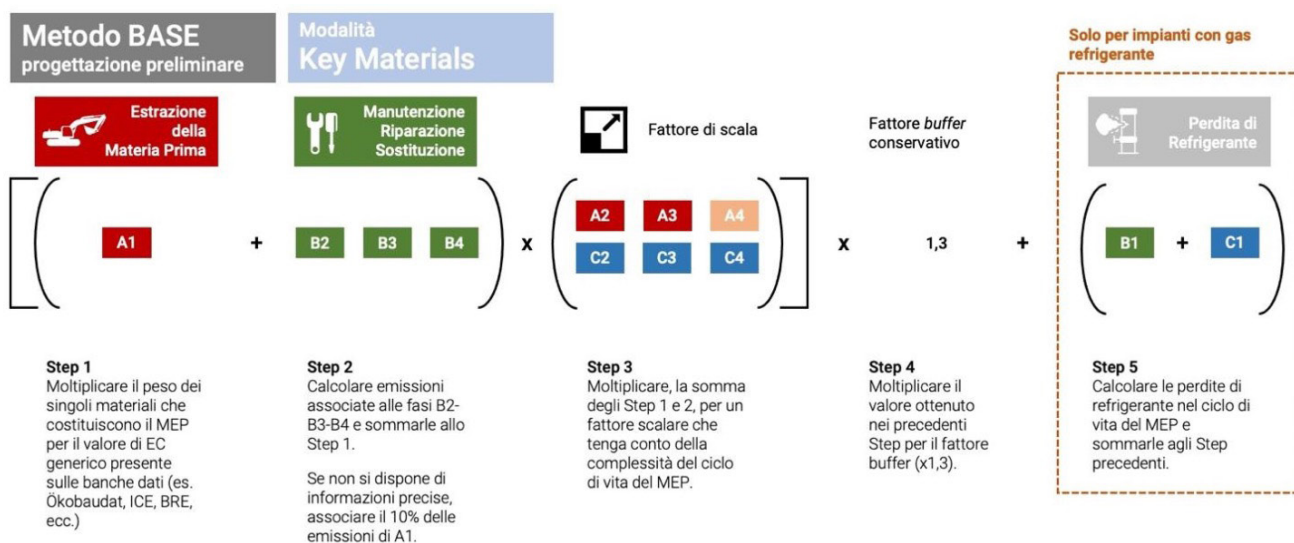


Figura 12.2 – Quadro sinottico del metodo BASE: modalità Key Materials.

12.2.2 Valutazione dell'EC con metodo AVANZATO: procedura di calcolo

Il metodo AVANZATO si riferisce alla progettazione esecutiva o alla programmazione di operazioni di realizzazione del MEP e prevede il coinvolgimento dell'impresa appaltatrice (o esecutrice), dei produttori MEP, o eventualmente dei fornitori, nonché un elevato livello di elaborazione dei dati disponibili. Più precisamente, a fronte della disponibilità della documentazione tecnica – in cui si evidenziano con precisione le quantità di materiali e di prodotti che costituiscono il MEP – è possibile caratterizzare l'EC dovuta alla progettazione o alla sua messa in opera.

Se il MEP dispone di un EPD o di altre certificazioni (es. Carbon Footprint, Product Environmental Footprint, studi LCA, ecc.) recanti informazioni su una o più fasi del ciclo di vita, è possibile impiegare i valori forniti. In assenza di una dichiarazione o valutazione ambientale, i valori di EC potranno essere ricavati da schede tecniche di prodotto o da informazioni rese disponibili dagli attori del processo edilizio (produttori, fornitori, installatori ecc.).

Il calcolo dell'EC con metodo AVANZATO, a seconda delle informazioni reperibili sul MEP, può essere svolto tramite due modalità:

1. Dati verificati (*Verified data*)

Il produttore o fornitore dell'impianto dispone di una certificazione EPD o di altre valutazioni del profilo ambientale del MEP. Sarà pertanto possibile utilizzare i dati pubblicati per contabilizzare l'EC. Tuttavia, è necessario indagare con attenzione i contenuti del documento, per verificare le modalità di contabilizzazione associate alle perdite di gas refrigerante nelle fasi B1 e C1.

Se tali emissioni non sono state valutate, è consigliabile adottare la metodologia di calcolo proposta per metodo BASE: Step 5 (si veda anche il paragrafo 12.3).

2. Materiali principali (*Key Materials*) che costituiscono il MEP

Se il produttore non dispone di una certificazione EPD o di altre certificazioni del MEP, si prevede la modalità di calcolo *Key Materials*. In questo caso, i dati da esperire sono:

- bilancio di massa del MEP, costituito da almeno il 95% dei materiali (il restante 5% è considerato acciaio);
- tipologia e quantità di refrigerante utilizzato (kg);
- vita utile del MEP (anni);
- stima dell'energia impiegata per la produzione (fase A3) del MEP;
- luogo di assemblaggio finale (regione o paese).

È importante che le informazioni siano elaborate in collaborazione con il produttore o il progettista dell'impianto, e descritte dal valutatore.

12.2.2.1 Valutazione dell'EC con metodo AVANZATO: procedura di calcolo

La contabilizzazione dell'EC dei MEP fa riferimento alle modalità precedentemente illustrate in relazione alle condizioni specifiche di progettazione o di studio del ciclo di vita del manufatto edilizio.

La procedura di calcolo prevede 6 Step per la modalità di calcolo basata su *Verified Data* (Figura 12.3) e 7 Step per la modalità riferita ai cosiddetti *Key Materials* (Figura 12.4). Gli step – per entrambe le modalità – sono sequenziali.

Step 1_Calcolo dell'EC della fase A (Produzione)

La prima parte della procedura di calcolo prevede che venga contabilizzata l'EC della fase di Produzione (A) del MEP, raggruppata in tre sottofasi: estrazione delle materie prime (A1), trasporto al sito produttivo (A3) e trasformazione in prodotti finiti e semilavorati (A3).

Nel caso in cui si adotti la modalità *Verified Data*, è possibile attingere ai valori di A1, A2 e A3 riportati nelle certificazioni.

Nel caso, invece, il produttore, l'installatore o il fornitore del MEP non dispongano di una certificazione ambientale si prevede di utilizzare la modalità di calcolo *Key Materials*. In questo caso, il calcolo dovrà essere svolto per le fasi A1, A2 e A3, come segue:

1. Estrazione delle Materie Prime (A1)

L'EC della fase A1 si calcola moltiplicando il peso di ogni materiale (kg) contenuto nel MEP, per il rispettivo valore di EC (kgCO₂eq) desunto da una delle banche dati di riferimento (si veda paragrafo 5.7). In conformità alle indicazioni della TM65, i materiali e i prodotti selezionati, ai fini del calcolo dell'EC, dovrebbero corrispondere al 95% di quelli che costituiscono un MEP; il rimanente 5% dei materiali si stabilisce sia contabilizzato come acciaio.

2. Trasporto al sito di produzione (A2)

L'EC della fase A2 si determina mediante due approcci, che dipendono dalle informazioni rese disponibili dal produttore, fornitore e/o installatore.

- **Le informazioni inerenti la tipologia di mezzo (carico utile, ecc.) e le distanze sono note.** Il calcolo può essere svolto secondo la medesima metodologia proposta nel paragrafo 7.1.
- **Le informazioni relative al trasporto non sono note.** In questo caso, si rende necessario ipotizzare il mezzo di trasporto (es. autocarro 26t, furgone, ecc.) e le relative distanze. Queste ultime, in conformità con la TM65, si differenziano in base alla complessità del MEP.

La Tabella 12.2, illustra degli scenari di trasporto (A2) in relazione alla complessità del prodotto. Tale distanza, è da considerarsi univoca per tutti i materiali e prodotti selezionati nella fase A1. La procedura di calcolo, una volta selezionata la distanza, prevede che i dati siano elaborati secondo la metodologia descritta nel paragrafo 7.1.

Complessità del prodotto	Esempio	Fattore di scala
Bassa	Tubi, cavi, condotti, valvole, dispositivi di allarme antincendio, prese elettriche, ecc.	1500 km su gomma
Media	Pompe, corpi illuminanti, radiatori, pannelli di controllo, dispositivi di regolazione dell'illuminazione, sensori, accumulatori termici, ecc.	3000 km su gomma
Alta	Unità di trattamento dell'aria, pompe di calore, caldaie, unità di interfaccia termica, refrigeratori, generatori, MVHR, quadri elettrici, UPS	6000 km su gomma

Tabella 12.2 – Stima delle distanze di trasporto (A2) in relazione alla complessità del prodotto.

3. Trasformazione in prodotti finiti e semilavorati (A3)

La contabilizzazione dell'EC associata alla fase di trasformazione in prodotti finiti e semilavorati (A3) necessita di un coinvolgimento attivo da parte del produttore. Il calcolo si svolge attraverso una stima del consumo energetico annuale per la produzione del MEP, cui corrispondono emissioni di anidride carbonica equivalente.

I quantitativi di ogni vettore energetico, impiegati per la produzione del MEP, sono poi moltiplicati per un fattore di emissione specifica; nell'ambito del presente testo, si segnalano quelli messi a disposizione da ISPRA [59] per il territorio italiano. Nel caso in cui il produttore impieghi energia rinnovabile il fattore di emissione specifica è assunto pari a 0.

Infine, a causa della complessità nella produzione dei MEP, si prevede in maniera cautelativa di moltiplicare il valore di EC – relativo ai consumi energetici – per i teorici cicli di produzione. La Tabella 12.3 propone un fattore moltiplicativo dell'EC, in funzione della complessità del MEP.

Complessità del prodotto	Esempio	Fattore di scala
Bassa	Tubi, cavi, condotti, valvole, dispositivi di allarme antincendio, prese elettriche, ecc.	x1
Media	Pompe, corpi illuminanti, radiatori, pannelli di controllo, dispositivi di regolazione dell'illuminazione, sensori, accumulatori termici, ecc.	x2
Alta	Unità di trattamento dell'aria, pompe di calore, caldaie, unità di interfaccia termica, refrigeratori, generatori, MVHR, quadri elettrici, UPS	x4

Tabella 12.3 – Fattore moltiplicativo dell'EC in funzione della complessità del MEP.

Step 2_ Calcolo dell'EC della fase A4 (Trasporto al cantiere)

La seconda parte del calcolo si riferisce alla stima delle emissioni associate alla fase di trasporto in cantiere (A4) e prevede di applicare la medesima procedura di calcolo proposta nel paragrafo 7.1.

A integrazione delle prescrizioni presenti nella norma UNI EN 16258:2013, la Tabella 12.4 illustra gli scenari di trasporto (locale, nazionale, europeo e globale) [9] e le relative distanze stimate con cui determinare l'EC.

Contesto di produzione	Distanza su strada (km)	Distanza su nave (km)
Locale	50	/
Nazionale	300	/
Europeo	1500	/
Globale	200	10000

Tabella 12.4 – Scenari di trasporto e relative distanze da utilizzare per il calcolo dell'EC.

Step 3_Calcolo dell'EC della fase B (Uso)

Questo step è finalizzato alla determinazione dell'EC relativa alla fase d'uso, associata alle operazioni di manutenzione (B2), riparazione (B3) e sostituzione (B4) dei materiali che costituiscono il MEP.

Nel caso in cui si adotti la modalità **Verified Data**, è possibile utilizzare i valori di B2, B3 e B4 riportati sulle certificazioni.

Nel caso in cui, invece, il produttore, l'installatore o il fornitore del MEP non disponga di una certificazione che ne fornisca le caratteristiche ambientali, si prevede di utilizzare la modalità di calcolo **Key Materials**, così come descritto nello Step 2 del paragrafo 12.2.1.1.

Step 4_Calcolo dell'EC della fase C (Fine Vita)

Nello Step 4, la procedura di calcolo dell'EC si riferisce alle emissioni di anidride carbonica equivalente riferite al fine vita del MEP, ed è caratterizzata da quattro distinte fasi: demolizione (C1), trasporto al sito di trattamento dei rifiuti (C2), trattamento dei rifiuti (C3) e smaltimento finale (C4).

Anche per questa fase, in modo coerente a quanto stabilito dalla TM65, la fase C1 (demolizione) – intesa come le operazioni manuali, o tramite attrezzature, necessarie a smantellare e decostruire il MEP – può essere esclusa dal calcolo poiché caratterizzata da emissioni minime. Tuttavia, tale decisione deve essere opportunamente giustificata dal valutatore.

In particolare, la procedura di contabilizzazione prevede, nel caso in cui si adotti la modalità *Verified Data*, di attingere i valori di C1, C2, C3 e C4 presenti sulle certificazioni.

Qualora il produttore, l'installatore o il fornitore del MEP non dispongano di una certificazione che attesti il profilo ambientale del MEP, si prevede di utilizzare la modalità di calcolo *Key Materials*. Il calcolo dovrà pertanto essere svolto per le fasi C1, C2, C3 e C4 come segue:

• Demolizione (C1)

La procedura di calcolo, relativa ai processi in cui si impiegano macchinari di cantiere, utilizza il medesimo iter adottato per determinare l'EC_{A5'} descritto nel paragrafo 7.2 e nel paragrafo 9.1;

• Trasporto al sito di trattamento dei rifiuti (C2)

La contabilizzazione dell'EC associata alla fase di trasporto al sito di trattamento dei rifiuti (C2), prevede di applicare la medesima procedura di calcolo descritta nei paragrafi 7.1 e 9.2.

A integrazione delle prescrizioni presenti nella norma UNI EN 16258:2013, e in linea con le indicazioni proposte dalla TM65, se non si dispone di informazioni relative alla distanza di trasporto, si raccomanda di assumere un valore

pari a 100 km: comprensivo del trasporto al sito di trattamento e successivo trasporto in discarica.

Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)

La determinazione dell'EC riferita al fine vita dei materiali e dei prodotti che costituiscono il MEP, rappresenta una delle sezioni più complesse della valutazione. La contabilizzazione di questa fase richiede di sviluppare una serie di scenari di gestione di fine vita che presenta elementi di complessità del tutto simili a quelli descritti nel capitolo 9. La procedura di calcolo utilizza il medesimo iter descritto nel paragrafo 9.3. La tabella 12.5 riporta le indicazioni inerenti i possibili scenari di smaltimento dei materiali che costituiscono un MEP. Tali valori sono, anche per questa fase, ricavati dalla TM65. Come si evince dalla tabella, la valutazione dell'EC dei processi di gestione dei rifiuti ottenuti dalla demolizione e dalla rimozione di un MEP è indipendente rispetto a quella relativa ai materiali e ai prodotti che costituiscono il manufatto edilizio; per questi ultimi, come illustrato nel capitolo 9, si propongono differenti scenari di smaltimento (100% discarica vs 70% riciclo e 30% discarica). Qualora si dovesse stabilire che gli elementi edilizi e gli elementi di impianto devono essere valutati con gli stessi scenari di fine vita, sarà cura del valutatore stabilire e giustificare quali percentuali dovranno essere adottate.

Tipologia di prodotto	Riciclo/riuso	Discarica
Cavi metallici	50%	50%
Luci	45%	55%
Radiatori	80%	20%
Sistemi di generazione del calore	70%	30%
Sistemi di ventilazione	40%	60%
Tubi	90%	10%

Tabella 12.5 – Scenari di smaltimento e percentuali ad essi associate per il riciclo/riuso e la discarica.

Step 5_Moltiplicazione del valore di EC per il fattore *buffer*

Questa parte della procedura di calcolo si riferisce alla sola modalità **Key Materials**, e prevede che i valori identificati negli Step 1-4 siano moltiplicati per un fattore – denominato *buffer* – pari a 1,3.

Il fattore *buffer* aumenta del 30% il valore di EC precedentemente calcolato, come risultato di un approccio cautelativo (data la complessità degli impianti) nella contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica equivalente associate ai MEP.

Step 6_Calcolo dell'EC dovuta alla perdita di gas refrigerante

Lo Step 6 prevede di contabilizzare l'EC dei MEP che necessitano l'impiego di gas refrigerante per il loro funzionamento. Tali emissioni si verificano in seguito alla perdita di gas dall'impianto e, pertanto, si considerano associate alla fase d'Uso (B1) e alla fase di Demolizione (C1).

Per questa modalità di verifica, si rimanda al paragrafo 12.3, dove sono illustrati i passaggi utili alla determinazione dell'EC associata alla perdita di gas refrigerante.

Nel caso in cui il valutatore abbia la disponibilità di **Verified Data**, ovvero di certificazioni ambientali nelle quali siano disponibili informazioni relative alle percentuali di perdita del refrigerante, tali valori possono essere utilizzati al posto di quelli indicati nella Tabella 11.6.

In assenza, invece, di valori percentuali desumibili da certificazione, il calcolo viene eseguito con modalità **Key Materials**.

Step 7_Calcolo dell'EC totale del MEP

La settima e ultima parte del calcolo prevede di determinare il valore di EC del MEP, come sommatoria dei singoli valori determinati negli Step precedenti. Le Figure 12.3 e 12.4 illustrano la procedura di calcolo complessiva.

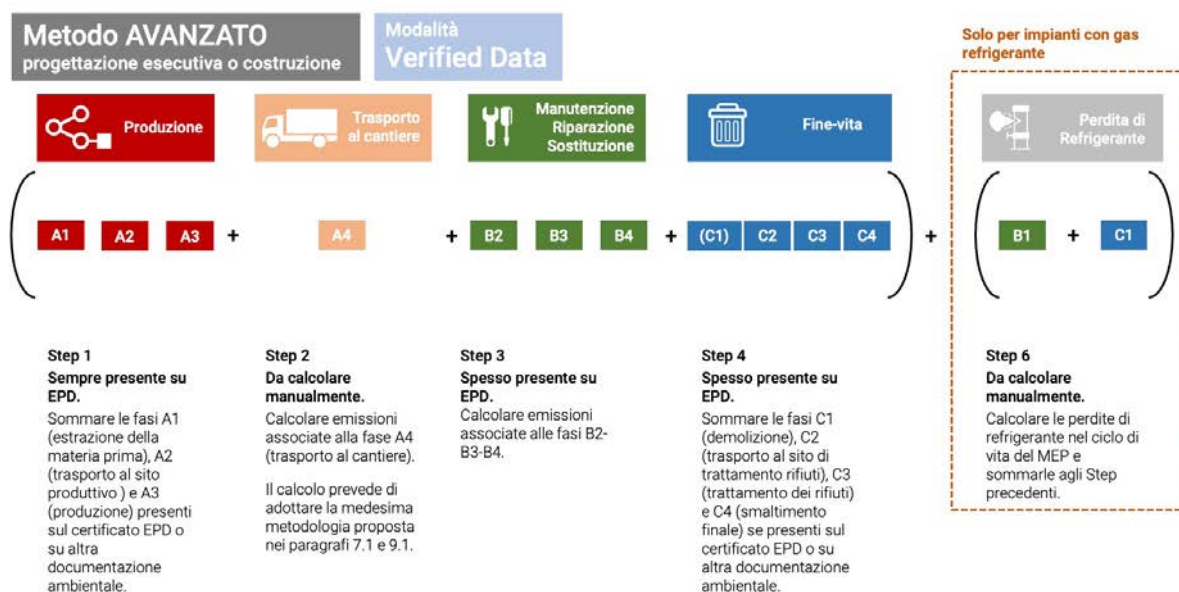


Figura 12.3 – Quadro sinottico del metodo AVANZATO: modalità Verified Data.

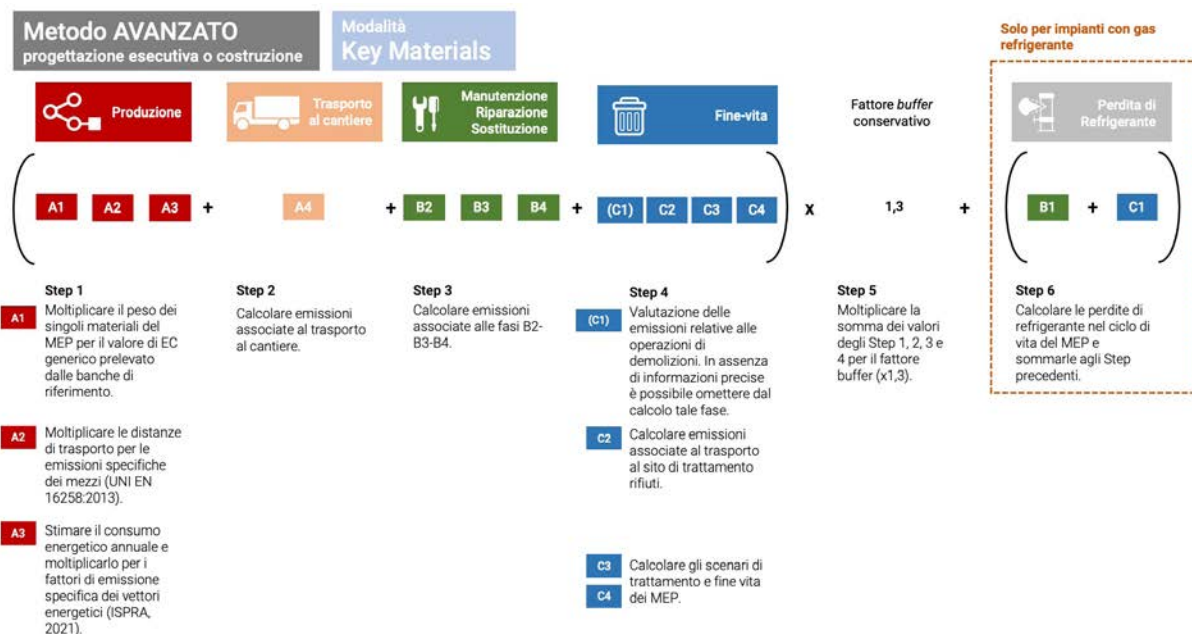


Figura 12.4 – Quadro sinottico del metodo AVANZATO: modalità Key Materials.

12.3 Perdite di refrigerante

Questo paragrafo definisce la modalità di contabilizzazione delle emissioni di carbonio equivalente, derivanti dalle perdite di gas refrigerante che caratterizzano alcune fasi del ciclo di vita del MEP. Le informazioni riportate sono da applicare sia al metodo di calcolo BASE sia a quello AVANZATO. Il testo è inoltre da considerare come un approfondimento dello Step 5 (paragrafo 12.2.1.1) e dello Step 6 (paragrafo

12.2.1.2). Nello specifico, il calcolo si riferisce alle fasi d’uso (B1) e demolizione (C1).

La valutazione richiede l’introduzione di tre scenari di riferimento per le perdite di gas refrigerante. La Tabella 12.6, ancora una volta, sviluppata utilizzando come riferimento la TM65, definisce tre tipologie di MEP cui associare – rispettivamente nella seconda e nella terza colonna – differenti tassi di perdita annuale (B) e a fine vita (C), espressi in percentuale.

Prodotto	Tasso di perdita annuale (B1 - uso)	Tasso di perdita a fine vita (C1 - decostruzione)
Tipo 1: Pompa di calore a parete o refrigeratore - senza gestione di refrigerante in loco	2%	1%
Tipo 2: Pompa di calore o refrigeratore - alcuni lavori alle tubature di refrigerante possono essere eseguiti in loco	4%	2%
Tipo 3: HVAC - lavori alle tubature di refrigerante e ricarica del gas eseguiti in loco	6%	3%

Tabella 12.6 – Tassi di perdita di gas refrigerante.

Una volta identificata la tipologia di prodotto e i tassi di perdita ad essa associati, il processo di elaborazione dei dati prevede di moltiplicarli per (Figura 12.5):

- 1) la quantità di refrigerante nel prodotto (kg);
- 2) il Global Warming Potential (GWP) del gas refrigerante, espresso in kgCO₂eq (reperibile attraverso banche dati);
- 3) la vita utile del prodotto (anni).

Il dato così ottenuto di EC dei gas refrigeranti per le fasi B1 e C1 può essere sommato all'EC dei materiali e dei prodotti che costituiscono il MEP (Figura 12.5), che è stata determinata tramite le modalità di contabilizzazione descritte in precedenza (si veda paragrafo 12.2.1 e 12.2.2).



Figura 12.5 – Calcolo delle emissioni derivanti dalle perdite di gas refrigerante.

Bibliografia

- [1] World Green Building Council (WGBC) (2019). Bringing embodied carbon upfront. Disponibile al sito: <https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/>
- [2] Global Alliance for Building and Construction (GlobalABC) (2021). Whole-life carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings. Disponibile al sito: <https://globalabc.org>
- [3] European Commission (2020). COM(2020) 662 final. A Renovation Wave for Europe – greening our buildings, creating jobs, improving lives. Disponibile al sito: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662>
- [4] Röck et al. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. Applied Energy 258.
- [5] Toth, Z., Volt, J. (2021). Whole-life carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Disponibile al sito: <https://www.bpie.eu>
- [6] Jungclaus, M., Esau, R., Olgay, V., Rempfer, A. (2021). Reducing Embodied Carbon in Buildings: Low-Cost, High-Value Opportunities. RMI. Disponibile al sito: <http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings>
- [7] European Commission (2021). COM(2021) 802 final. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast). Disponibile al sito: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0802&from=EN>
- [8] Architects Climate Action Network (2021). The Carbon Footprint of Construction. A report for politicians & policymakers. Disponibile al sito: <https://www.architectscan.org>
- [9] Papakosta, A., Sturgis, S. (2018). Whole life carbon assessment for the built environment. In Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) (a cura di). Disponibile al sito: <https://rics.org>
- [10] London Energy Transition Initiative (LETI) (2020). LETI Climate Emergency Design Guide: How new buildings can meet UK climate change targets. Disponibile al sito: <https://www.leti.london>
- [11] London Energy Transition Initiative (LETI) (2020). LETI Embodied Carbon Primer: Supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide. Disponibile al sito: <http://www.aed.consulting/public/climate/LETI%20Embodied%20Carbon%20Primer.pdf>
- [12] World Green Building Council (WGBC) (2020). BuildingLife. Disponibile al sito: <https://www.worldgbc.org/buildinglife>
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Disponibile al sito: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kamiyamaguchi. Disponibile al sito: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [15] Task force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI) (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (a cura di). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kamiyamaguchi. Disponibile al sito: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [16] GreenHouse Gas Protocol (2011). Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Disponibile al sito: <https://ghgprotocol.org/product-standard>
- [17] Giordano R. (2010). I prodotti per l'edilizia sostenibile. Sistemi Editoriali, Napoli.
- [18] Decreto inter-Ministeriale 26 giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.
- [19] Decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380. Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia.
- [20] Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».
- [21] 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: Part 3: How to make performance assessments using Level(s) (Beta v1.0). Publications Office of the European Union, Luxembourg. Disponibile al sito: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109286>
- [22] European Commission, Directorate-General for Environment, Spirinckx, C., Thuring, M., Damen, L., Allacker, K., Mirabella, N., Ramon, D., Passer, A., Röck, M. (2018). Study and related guidance documents on the application of the PEF method to a new office building. Publications Office. Disponibile al sito: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/23505>
- [23] BREEAM UK New Construction (2014). Non-domestic Buildings (Scotland): Technical Manual. Disponibile al sito: www.breem.com
- [24] Minergie (2013). Calcolo dell'Energia Grigia per gli edifici. Disponibile al sito: <https://www.minergie.ch/it/>
- [25] The Institution of Structural Engineers (2022). How to Calculate Embodied Carbon. Disponibile al sito: <https://www.istructe.org/resources/guidance/how-to-calculate-embodied-carbon/>
- [26] European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (CLECAT) e Deutsche Spedition- und Logistikverband e.V (DSL) (2012). Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258: Terms, Methods, Examples. Disponibile al sito: https://www.clecat.org/media/CLECAT_Guide_on_Calculating_GHG_emissions_for_freight_forwarding_and_logistics_services.pdf
- [27] Confederazione Generale Italiana dei Trasporti e della Logistica (confetra). Disponibile al sito: <https://www.confetra.com/pesi-dimensioni-veicoli-industriali/>
- [28] ISPRA (2021). Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia 2021-V2. Disponibile al sito: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj9kb6lgYP6AhU-S_EDHY-oxB5kQFnoECAYQAQ&url=http%3A%2F%2Femissioni.sina.isprambiente.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F02%2F-Fattori-emissione-produzione-e-consumo-elettricit%2A-2021-V2.xlsx&usq=AOvVaw1IMR030eOGPS3zHtuJy6wQ
- [29] South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD). SCAB (South Coast Air Basin fleet average emission factors). Disponibile al sito: <http://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/ceqa/air-quality-analysis-handbook/off-road-mobile-source-emission-factors>

- [30] WRAP. Net Waste Tool. Disponibile al sito: <https://carbon.tips/nwtool>
- [31] The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) (2021). TM65: Embodied carbon in building services a calculation methodology. Hobbs the Printers, Ltd, Totton.
- [32] Pederneiras, C. M., Farinha, C. B., Veiga, R. (2022). Carbonation Potential of Cementitious Structures in Service and Post-Demolition: A Review. *CivilEng* 2, pp. 211-223.
- [33] Greater London Authority (2022). London Plan Guidance: Whole Life-Cycle Carbon Assessment. Disponibile al sito: https://www.london.gov.uk/sites/default/files/pg_-_wlca_guidance.pdf
- [34] CIB W080 Commission – Prediction of Service Life of Building Materials and Components (2021). Methodology for modelling the service life prediction using the factor method. Disponibile al sito: https://cibworld.org/wp-content/uploads/2022/01/CIBW080-Factor-method_report_v14-final.pdf
- [35] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) & Building Cost Information Service (BCIS) (2006). Life Expectancy of Building Components: A Practical Guide to Surveyors' Experiences of Buildings in Use.
- [36] Goulouti, K., Favre, D., Giorgi, M., Padey, P., Galimshina, A., Habert, G., Lasvaux, S. (2021). Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution. *Data in Brief* 36, 107062.
- [37] CDW Engineering – Consulting Engineers (2022). Average Life Expectancies. Disponibile al sito: <http://cdwengineering.com/average-life-expectancies/>
- [38] Etool Global. Typical Life Expectancy of Building Components. Disponibile al sito: <https://etoolglobal.com/wp-content/uploads/2015/10/BuildingComponentLifeExpectancy.pdf>
- [39] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen. Disponibile al sito: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauedaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2011-11-03.pdf
- [40] International Association of Certified Home Inspectors. InterNACHI's Standard Estimated Life Expectancy Chart for Homes. Disponibile al sito: <https://www.nachi.org/life-expectancy.htm>
- [41] Building Owners and Managers Association (BOMA) (2010). Preventive Maintenance Guidebook: Best Practices to Maintain Efficient and Sustainable Buildings. Disponibile al sito: <https://icap.sustainability.illinois.edu/files/projectupdate/2289/Project%20Lifespan%20Estimates.pdf>
- [42] Organizzazione delle Nazioni Unite (2015). Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Disponibile al sito: <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- [43] Commissione Europea, COM 640 (2019). Il Green Deal europeo. Disponibile al sito: https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF
- [44] Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022). Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions. Disponibile al sito: <https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>
- [45] Wood for Good (2013). Lifecycle Database: Kiln Dried Sawn Softwood. Disponibile al sito: <https://carbon.tips/wfg>
- [46] Possan, E., Felix, E. F., Thomaz, W. A. (2016). CO2 uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. *J Build Rehabil* 1, 7.
- [47] Maia Pederneiras, C.; Brazão Farinha, C.; Veiga, R. (2022). Carbonation Potential of Cementitious Structures in Service and Post-Demolition: A Review. *CivilEng*, 3, pp. 211–223.
- [48] Renovation of public Buildings and Urban Spaces (REBUS). Foglio di calcolo "BENEFITS_Valutazione". Disponibile al sito: <https://territorio.regione.emilia-romagna.it/urbanistica/corsi-formazione/rebus-laboratorio-rigeneraz-urbana-cambiam-climatici#autotoc-item-autotoc-5>
- [49] Associazione Vivaisti Pistoiesi (2015). Qualiviva: La qualità nella filiera florovivaistica nazionale attraverso l'utilizzo e la divulgazione delle schede varietali e di un capitolato unico di appalto per le opere pubbliche. Disponibile al sito: <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/9785>
- [50] Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishihara, T., Kou, D., Tushima, K., Ando, M., Shindo, S. (2018). CO2 Payoff of Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species. *Sustainability* 10, 2256.
- [51] Forrester, D., Tachauer, E., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T., Chakraborty, T., Saha, S., Sileshi, G. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396, 160-175. Disponibile al sito: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106602>
- [52] Zianis, D., Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187, 311-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>
- [53] Fehrmann, L., Kleinn, C. (2006). General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecology and Management* 236, 412-421. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.026>
- [54] Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257, 427-434. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>
- [55] My-Tree. Disponibile al sito: <https://mytree.itreetools.org/#/>
- [56] Bagenal, G. C., Hamot, L., Levey, R. (2019). Understanding the importance of Whole Life Carbon in the selection of heat-generation equipment. *Proc. CIBSE Technical Symposium: Transforming Built Environments – driving change with engineering*, University of Sheffield.
- [57] Hamot, L. (2019). Getting to grips with whole-life carbon. *CIBSE Journal* November. Disponibile al sito: <https://www.cibsejournal.com/general/getting-to-grips-with-whole-life-carbon>
- [58] Hamot, L., Boennec, O., Dugdale, H. (2020). Refrigerant & Environmental Impacts: a best practice guide. London: Elementa Consulting. Disponibile al sito: <https://www.elementaconsulting.com/news/refrigerants-environmental-impacts>
- [59] ISPRA (2021). Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico, rapporto 343/2021. Disponibile al sito: <https://www.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/r343-2021.pdf>
- [60] TOTEM: Create | Evaluate | Innovate (2021). Method – Maintenance scenarios TOTEM. Disponibile al sito: <https://www.to-tem-building.be/pages/download/list.xhtml>



Green
Building
Council
Italia

www.gbcitalia.org/building-life/
www.worldgbc.org/buildinglife/

#BUILDINGLIFE
#ROADMAP2050

Contatti:

valentina.marino@gbcitalia.org
direttore@gbcitalia.org
internazionale@gbcitalia.org

ISBN 978-88-6627-378-3