

TESISTA
RELATORE
CORRELATORE

STEFANO
PROFESSOR
DOTTORANDO

ROBERTO
JACOPO

IACOVACCI
GIORDANO
ANDREOTTI

WHOLE LIFE CARBON

ROADMAP PER LA DECARBONIZZAZIONE : APPLICAZIONE DELLA
METODOLOGIA WHOLE LIFE CARBON E SUE PROSPETTIVE DI SVILUPPO
/
ROADMAP FOR DECARBONISATION : APPLICATION OF THE WHOLE
LIFE CARBON ASSESSMENT AND ITS DEVELOPMENT PERSPECTIVES

TESISTA
RELATORE
CORRELATORE

STEFANO
PROFESSOR
DOTTORANDO

ROBERTO
JACOPO

IACOVACCI
GIORDANO
ANDREOTTI

WHOLE LIFE CARBON

ROADMAP PER LA DECARBONIZZAZIONE : APPLICAZIONE DELLA
METODOLOGIA WHOLE LIFE CARBON E SUE PROSPETTIVE DI SVILUPPO
/
ROADMAP FOR DECARBONISATION : APPLICATION OF THE WHOLE
LIFE CARBON ASSESSMENT AND ITS DEVELOPMENT PERSPECTIVES





WHOLE

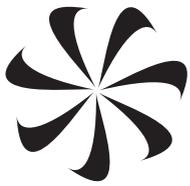


LIFE

In collaborazione con:



**Green
Building
Council
Italia**



CARBON

Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale
"Architettura per la Sostenibilità"



ABSTRACT

Obiettivi e struttura della tesi

Il lavoro di Tesi Magistrale, svolto all'interno del progetto *#BuildingLife2* del *Green Building Council Italia* e con la supervisione del Professor Roberto Giordano e del Dottorando Jacopo Andreotti, nasce dal profondo interesse nei confronti delle più **contemporanee** accezioni e modalità di rendicontazione delle emissioni di anidride carbonica connesse con la realizzazione e l'utilizzo di un manufatto architettonico.

Lo scopo di questo lavoro sarà quello di restituire una visione chiara e concreta di quali saranno le competenze di cui, nel breve periodo, il progettista dovrà dotarsi per la realizzazione di un progetto consapevolmente sostenibile.

Si segnala, inoltre, come il presente lavoro si inserisca all'interno di uno scenario estremamente **dinamico**, caratterizzato da un continuo e approfondito studio sia da parte degli organi politici europei sia dal mondo accademico, il che contribuisce a rendere la seguente Tesi un lavoro che, seppur il più possibile accurato, non può essere considerato come concluso.

La tematica fondante e centrale di questa Tesi riguarda la comprensione e l'applicazione

pratica della metodologia di rendicontazione *Whole Life Carbon*, per la cui trattazione e restituzione si sono impiegati numerosi documenti di recente pubblicazione (nazionali ed europei), con l'intento di restituire una lettura critica e precisa riguardo alla tematica oggetto della Tesi.

Più precisamente, la documentazione è servita per mostrare con chiarezza il possibile impiego delle nuove metodologie WLC, capaci non solo di valutare l'impatto ambientale di un progetto, bensì in grado di **armonizzare** e mettere in relazione valori di anidride carbonica afferenti diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio (come nel caso della Embodied Carbon e dall'Operational Carbon)

L'obiettivo centrale sarà quindi di approfondire vari aspetti legati alla metodologia sotto diversi punti di vista (teorici e applicativi), al fine di consegnare una serie di strumenti utili alla contabilizzazione e contestualmente al controllo delle emissioni di anidride carbonica prodotte durante la realizzazione e l'utilizzo di un generico manufatto architettonico.

La Tesi è quindi organizzata secondo tre parti, di seguito illustrate. La prima è di

inquadramento della tematica sotto un punto di vista teorico (Parte 1), in cui si analizzano dapprima le politiche e le iniziative adottate in ambito globale, europeo e nazionale in merito al concetto di *Whole Life Carbon*, per poi arrivare ad una **definizione** della metodologia da adottare per la fase di *accounting* (Parte 2).

La terza parte della Tesi, invece, è dedicata all'**applicazione** della metodologia WLC a un caso di studio reale, per il quale si intende contabilizzare le emissioni di CO₂eq lungo tutto il ciclo di vita.

Questa fase si pone un obiettivo **specifico**: determinare gli impatti ambientali connessi a un edificio esistente e proporre delle soluzioni di decarbonizzazione dello stesso manufatto. Più nel dettaglio, si è deciso di analizzare un'abitazione monofamiliare su due livelli (tipologia edilizia diffusa nel panorama provinciale piemontese) realizzata nel 2007 da parte della società *Sarotto Group* a Narzole (CN).

Il caso studio, analizzato in stretto contatto con la *Sarotto Group*, è pertanto il punto di **partenza** (costruttivo e ambientale) sul quale impostare un lavoro di riprogettazione e

re-thinking capace di azzerare le emissioni di CO₂eq lungo il ciclo di vita del manufatto, operando sugli indicatori di Embodied Carbon e Operational Carbon.

Le strategie messe in atto per determinare, prima, e gestire, poi, le emissioni di CO₂eq di un manufatto edilizio concorrono ad **arricchire** il panorama di ricerche e studi sul tema della decarbonizzazione del settore delle costruzioni; divenuto preponderante nei piani europei al fine di perseguire la neutralità climatica entro il 2050.

Gli esiti del presente lavoro saranno poi oggetto di **condivisione** all'interno di un più ampio lavoro di ricerca, ovvero il progetto europeo *Indicate*, al quale il Politecnico di Torino e il Green Building Council Italia (assieme ad altri centri di ricerca ed università) stanno partecipando al fine di approfondire le ricadute della metodologia WLC sul panorama italiano.

ABSTRACT

Aims and structure of the thesis

The Master Thesis work, carried out within the *#BuildingLife2* project of the *Green Building Council Italia* and under the supervision of Professor *Roberto Giordano* and PhD student *Jacopo Andreotti*, stems from the profound interest in the most **contemporary** concepts and methods of accounting for carbon dioxide emissions associated with the realisation and use of an architectural artefact.

The aim of this work will be to give a clear and concrete vision of what skills the designer will need in the short term to realise a consciously sustainable project.

It should also be noted that this work is part of an extremely **dynamic** scenario, characterised by continuous and in-depth study by both European political bodies and the academic world, which contributes to making the following Thesis a work that, although as accurate as possible, cannot be considered as concluded.

The founding and central theme of this Thesis concerns the understanding and practical application of the *Whole Life Carbon* reporting methodology, for the treatment and restitution of which numerous recently

published documents (national and European) have been used, with the intention of returning a critical and accurate reading of the Thesis subject.

More precisely, the documentation served to clearly show the possible use of the new WLC methodologies, capable not only of assessing the environmental impact of a project, but also able to **harmonise** and relate carbon dioxide values pertaining to different phases of the building life cycle (as in the case of *Embodied Carbon* and *Operational Carbon*)

The central objective will therefore be to deepen various aspects related to the methodology from different points of view (theoretical and applicative), to deliver a series of useful tools for accounting and contextually controlling the carbon dioxide emissions produced during the realisation and use of a generic architectural artefact.

The Thesis is therefore organised in three parts, illustrated below. The first is a **framework** of the theme from a theoretical point of view (Part 1), in which we first analyse the policies and initiatives adopted in the global, European, and national spheres regarding the concept

of Whole Life Carbon, and then arrive at a **definition** of the methodology to be adopted for the accounting phase (Part 2).

The third part of the Thesis, on the other hand, is dedicated to the **application** of the WLC methodology to a real case study, for which the intention is to account for CO_{2eq} emissions throughout the life cycle.

This phase has a **specific** objective: to determine the environmental impacts associated with an existing building and to propose solutions for the decarbonisation of the same building. More specifically, it was decided to analyse a single-family dwelling on two levels (a common building type in the Piedmonts' provincial landscape) built in 2007 by the *Sarotto Group* company in Narzole (CN).

The case study, analysed in close contact with the *Sarotto Group*, is therefore the starting point (constructive and environmental) on which to set up a redesign and re-thinking project capable of zeroing CO_{2eq} emissions throughout the building's life cycle, working on Embodied Carbon and Operational Carbon indicators.

The strategies implemented to determine, firstly, and manage, then, the CO_{2eq} emissions of a building contribute to **enriching** the panorama of research and studies on the theme of decarbonisation of the construction sector, which has become preponderant in European plans to achieve climate neutrality by 2050.

The outcomes of this work will then be **shared** within a broader research work, namely the European project Indicate, in which the *Polytechnic of Turin* and the *Green Building Council Italia* (together with other research centres and universities) are participating to further investigate the effects of the WLC methodology on the Italian panorama.

INDICE

PRIMA PARTE

1. ABSTRACT

2. DEFINIZIONE DI WHOLE LIFE CARBON (WLC) DI UN MANUFATTO EDILIZIO

3. POLITICHE, STRATEGIE E STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE WLC
 - 3.1. Contesto Globale
 - 3.2. Contesto Europeo
 - 3.3. Contesto Nazionale

4. INIZIATIVE IN AMBITO EUROPEO A TEMA WLC
 - 4.1. Francia
 - 4.2. Danimarca
 - 4.3. Svezia
 - 4.4. Gran Bretagna
 - 4.5. Italia
 - 4.6. Analisi Comparativa

SECONDA PARTE

5. ASPETTI METODOLOGICI PER UNA VALUTAZIONE WLC

- 5.1. Fasi del ciclo di vita di un manufatto architettonico
- 5.2. Indicatori chiave: Embodied Carbon ed Operational Carbon
- 5.3. Metodo Base e Metodo Avanzato
- 5.4. Scelta degli elementi tecnici da contemplare nella valutazione
- 5.5. Ulteriori elementi caratterizzanti per una valutazione di Whole Life Carbon

6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON E DELL'OPERATIONAL CARBON DI UN MANUFATTO EDILIZIO

- 6.1. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Precostruzione (A0)
- 6.2. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Produzione (A1-A3)
- 6.3. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Costruzione (A4-A5)
 - 6.3.1. Embodied Carbon della fase di Trasporto al cantiere (A4)
 - 6.3.2. Embodied Carbon della fase di Costruzione (A5)
- 6.4. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Uso (B1-B5)
 - 6.4.1. Embodied Carbon della fase di Uso (B1)
 - 6.4.2. Embodied Carbon della fase di Manutenzione (B2) e di Riparazione (B3)
 - 6.4.3. Embodied Carbon della fase di Sostituzione (B4)
 - 6.4.4. Embodied Carbon della fase di Ristrutturazione (B5)
- 6.5. Contabilizzazione dell'OC nella fase di Uso (B6)
- 6.6. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Fine vita (C1-C4)
 - 6.6.1. Embodied Carbon della fase di Demolizione (C1)
 - 6.6.2. Embodied Carbon della fase di Trasporto dei rifiuti (C2)
 - 6.6.3. Embodied Carbon della fase di Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)
- 6.7. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Oltre il ciclo di vita (D)
 - 6.7.1. Benefici provenienti dalla fase D secondo un approccio di "circular economy"
- 6.8. Contabilizzazione dell'EC di Impianti e Servizi

- 6.8.1. Valutazione dell'Embodied Carbon attraverso metodo base
- 6.8.2. Valutazione dell'Embodied Carbon attraverso metodo avanzato

6.9. Determinazione della Whole Life Carbon

7. BOX 1- APPROFONDIMENTO SUL LEGNO

- 9.1. Carbon Sequestration - Fase di Produzione (A1-A3)
- 9.2. Carbon Sequestration - Fase di Fine vita (C3-C4)
- 9.3. Carbon Offsetting - Fase di Uso (B1) e fase Oltre il ciclo di vita (D)

8. BOX 2 - APPROFONDIMENTO DELLA METODOLOGIA TM54

TERZA PARTE

9. PROGETTO BIOCASA SAROTTO 2007

10. VALUTAZIONE WLC DELLA BIOCASA SAROTTO 2007

- 10.1. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Produzione (A1-A3)
- 10.2. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Costruzione (A4-A5)
 - 10.2.1. Embodied Carbon della fase di Trasporto al cantiere (A4)
 - 10.2.2. Embodied Carbon della fase di Costruzione (A5)
- 10.3. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Uso (B1-B5)
 - 10.3.1. Embodied Carbon della fase di Uso (B1)
 - 10.3.2. Embodied Carbon della fase di Manutenzione (B2) e di Riparazione (B3)

- 10.3.3. Embodied Carbon della fase di Sostituzione (B4)
- 10.3.4. Embodied Carbon della fase di Ristrutturazione (B5)
- 10.4. Contabilizzazione dell'OC nella fase di Uso (B6-B7)**
- 10.5. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Fine vita (C1-C4)**
 - 10.5.1. Embodied Carbon della fase di Demolizione (C1)
 - 10.5.2. Embodied Carbon della fase di Trasporto dei rifiuti (C2)
 - 10.5.2. Embodied Carbon della fase di Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)
- 10.6. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Oltre il ciclo di vita (D)**
- 10.7. Contabilizzazione dell'EC di Impianti e Servizi**
- 10.8. Determinazione della Whole Life Carbon**

11. PROGETTO BIOCASA 2050

12. VALUTAZIONE WLC DELLA BIOCASA 2050

- 12.1. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Produzione (A1-A3)**
- 12.2. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Costruzione (A4-A5)**
 - 12.2.1. Embodied Carbon della fase di Trasporto al cantiere (A4)
 - 12.2.2. Embodied Carbon della fase di Costruzione (A5)
- 12.3. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Uso (B1-B5)**
 - 12.3.1. Embodied Carbon della fase di Uso (B1)
 - 12.3.2. Embodied Carbon della fase di Manutenzione (B2) e di Riparazione (B3)
 - 12.3.3. Embodied Carbon della fase di Sostituzione (B4)
 - 12.3.4. Embodied Carbon della fase di Ristrutturazione (B5)
- 12.4. Contabilizzazione dell'OC nella fase di Uso (B6-B7)**
- 12.5. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Fine vita (C1-C4)**
 - 12.5.1. Embodied Carbon della fase di Demolizione (C1)
 - 12.5.2. Embodied Carbon della fase di Trasporto dei rifiuti (C2)
 - 12.5.3. Embodied Carbon della fase di Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4)
- 12.6. Contabilizzazione dell'EC nella fase di Oltre il ciclo di vita (D)**

12.7. Contabilizzazione dell'EC di Impianti e Servizi

12.8. Determinazione della Whole Life Carbon

13. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

14. ALLEGATI DI ANALISI - VALUTAZIONE WLC DELLA BIOCASA SAROTTO 2007

ALLEGATO 1 - Dettagli sul calcolo dell'EC nelle fasi A1-A3

ALLEGATO 2 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase A4

ALLEGATO 3 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase A5

ALLEGATO 4 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase B4

ALLEGATO 5 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase C1

ALLEGATO 6 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase C2

ALLEGATO 7 - Dettagli sul calcolo dell'EC e della Carbon Uptake nelle fasi C3-C4

ALLEGATO 8 - Dettagli sul calcolo dell'EC di Impianti e Servizi

ALLEGATO 9 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase D

15. ALLEGATI DI ANALISI - VALUTAZIONE WLC DELLA BIOCASA SAROTTO 2050

ALLEGATO 10 - Dettagli sul calcolo dell'EC nelle fasi A1-A3

ALLEGATO 11 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase A4

ALLEGATO 12 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase A5

ALLEGATO 13 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase B4

ALLEGATO 14 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase C1

ALLEGATO 15 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase C2

ALLEGATO 16 - Dettagli sul calcolo dell'EC e della Carbon Uptake nelle fasi C3-C4

ALLEGATO 17 - Dettagli sul calcolo dell'EC di Impianti e Servizi

ALLEGATO 18 - Dettagli sul calcolo dell'EC nella fase D

RINGRAZIAMENTI

BIBLIOGRAFIA

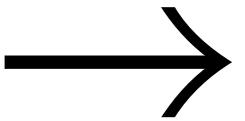
MAINE
CERTAINES DATES



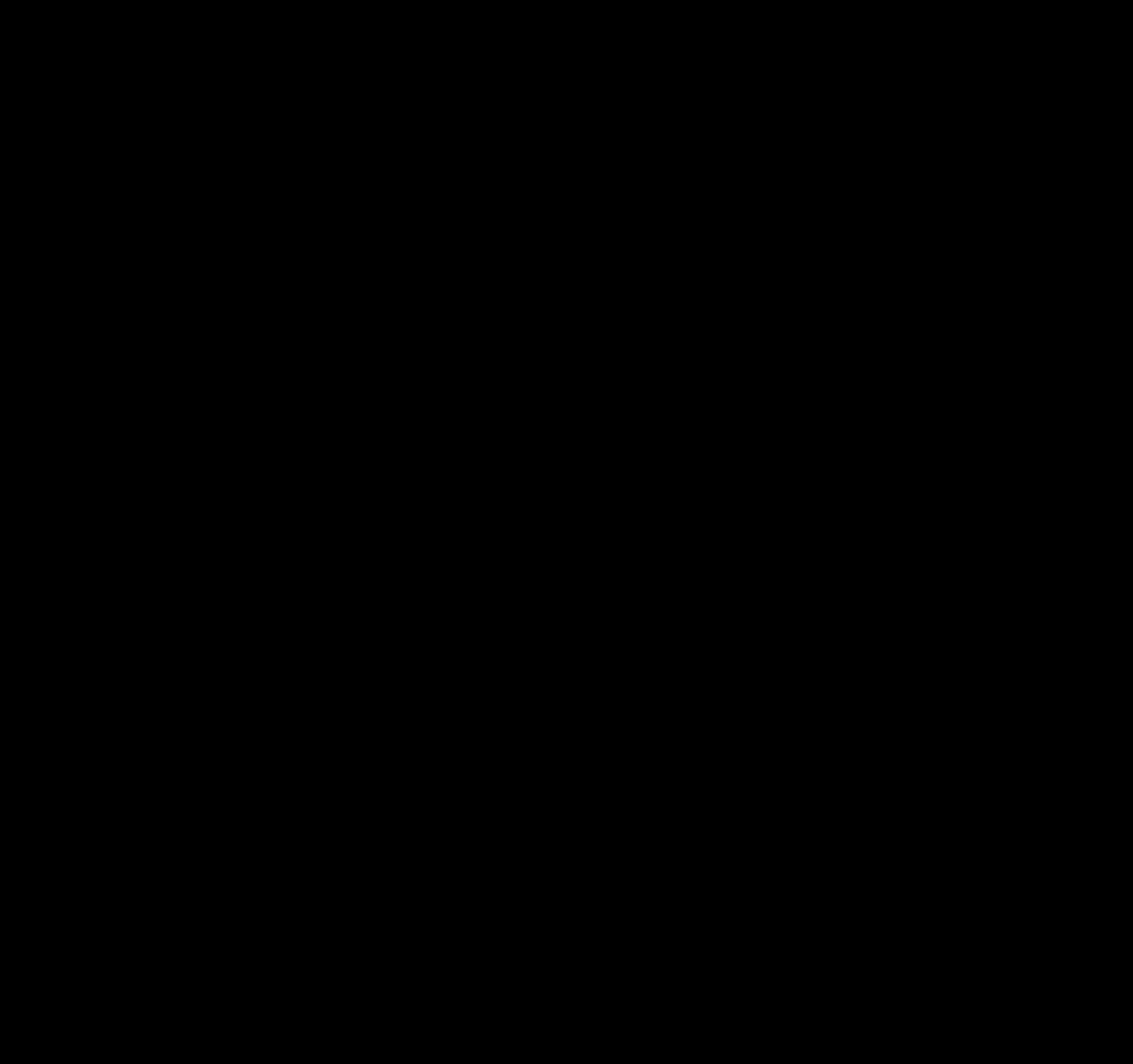
Le Monde est à vous

PROPRIETE PRIVEE
ACCES ET STATION
SERVICER





PRIMA PARTE



PRIMA PARTE

2. DEFINIZIONE DI WHOLE LIFE CARBON DI UN MANUFATTO EDILIZIO

3. POLITICHE, STRATEGIE E STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON

4. INIZIATIVE IN AMBITO EUROPEO A TEMA WHOLE LIFE CARBON

2. DEFINIZIONE DI WHOLE LIFE CARBON DI UN MANUFATTO EDILIZIO

Il cambiamento climatico rappresenta una delle principali tematiche oggetto di attenzione dell'attuale generazione. Dovuto dall'eccessiva concentrazione di gas ad effetto serra nell'atmosfera, prodotta in buona parte dalle azioni **antropogeniche** della società moderna, questo è causa di gravi effetti che orbitano tra la scena ambientale e quella economica ricadendo, inevitabilmente, su quella sociale (RICS 2023, p.9).

Per questo motivo, le iniziative e gli strumenti politici contemporanei, adottati su scala globale (come ad esempio l'Accordo di Parigi del 2015), si pongono l'obiettivo di individuare

delle strategie per la riduzione delle emissioni in atmosfera dell'anidride carbonica e dei gas ad effetto serra equivalenti.

Ad oggi, il settore delle **costruzioni** costituisce uno dei maggiori responsabili dell'emissione di anidride carbonica in atmosfera, attestandosi ad una percentuale del 36%, secondo i più recenti report. Oltre ciò, lo stesso settore è responsabile della produzione di circa il 30% dei rifiuti generati sul territorio europeo.

Per queste ragioni, oggi il patrimonio edilizio risulta essere uno degli elementi chiave all'interno di quegli strumenti politici che hanno

lo scopo di delineare strategie in grado di consentire una transizione energetica e una progressiva **decarbonizzazione** del settore delle costruzioni.

Tali strumenti, nel corso degli anni, hanno però **ampliato** il concetto stesso di decarbonizzazione; infatti, se nel passato questo era connesso in maniera preponderante al concetto di ridurre il più possibile le sole emissioni di carbonio operativo (quindi emissioni generate nella fase di Uso di un manufatto architettonico), oggi questi strumenti stanno incominciando a richiedere una conoscenza, di tutte le emissioni definite come “incorporate”, ossia tutte quelle emissioni di anidride carbonica associate alle fasi di produzione, trasporto, costruzione, manutenzione e smaltimento dei materiali o delle componenti tecniche edilizie impiegate all’interno di un progetto architettonico. La conoscenza e la contabilizzazione di queste emissioni, risulta infatti essere di fondamentale importanza per comprendere la correlazione

tra le diverse tipologie di emissioni prodotte durante il ciclo di vita di un manufatto edilizio, al fine di ottenere un parco immobiliare a **zero** impatti di carbonio entro il 2050.

Inoltre, l’integrazione di questa tipologia d’impatto all’interno delle più recenti normative (si veda il caso della EPDB recast 2021), necessita di una concreta **evoluzione** delle metodologie di analisi degli impatti e, allo stesso tempo, anche degli approcci nella progettazione degli edifici.

Ne consegue che agli attori del processo edilizio venga richiesto non solo di efficientare la fase operativa con soluzioni impiantistiche a basso impatto ambientale ma anche di gestire un complesso di fasi che, connesse ai prodotti da costruzione, limitano o azzerano le emissioni di gas climalteranti prodotte durante le fasi di trasporto, costruzione, manutenzione e demolizione (GBCItalia 2022b, p. 3).

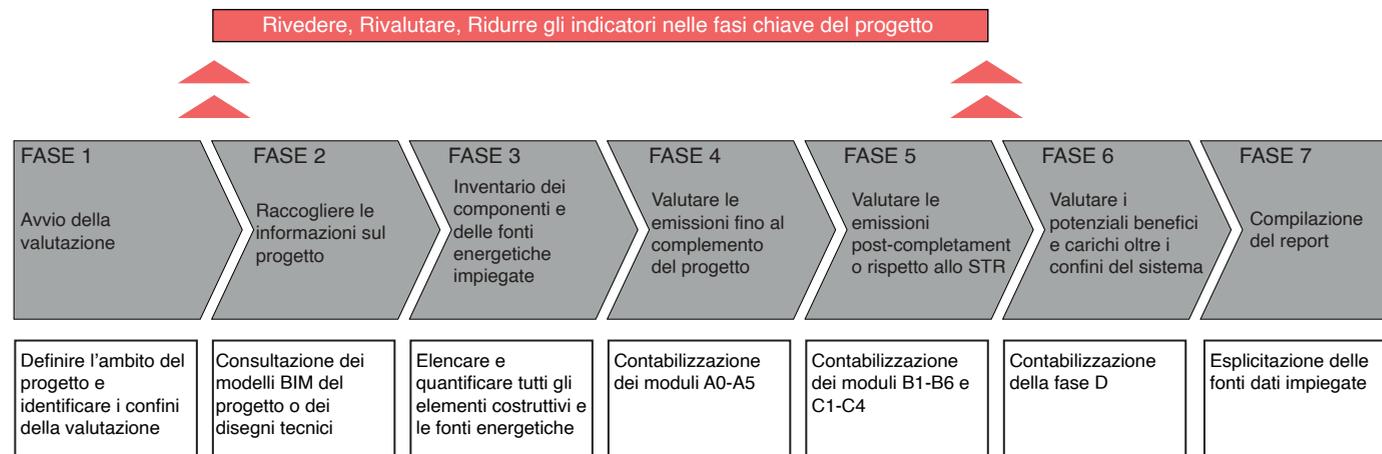


Fig.1 Passaggi consigliati per una corretta rendicontazione e valutazione del WLC (elaborazione da parte dell'autore su fonte RICS [42])

Questa tipologia di contabilizzazione, che prevede di considerare all'interno del **bilancio** di carbonio finale le emissioni di anidride carbonica operativa e incorporata durante il ciclo di vita di un manufatto architettonico (noti come indicatori di *Embodied Carbon* e di *Operational Carbon*), assume il nome di *Whole Life Carbon* (GBCItalia 2022d, p. 8).

Tale bilancio, nel dettaglio, si baserà su un conteggio delle emissioni suddivise secondo **ogni** fase del ciclo di vita (Fig.1), andando a valutare dapprima le emissioni afferenti alla fase A, indicando perciò gli apporti di anidride carbonica prodotti dalla realizzazione dei materiali da costruzione (A1-A3), dal loro trasporto al cantiere (A4) e dalla costruzione degli edifici (A5); passando agli apporti della fase di uso, manutenzione, sostituzione, ristrutturazione (B1-B5) e di gestione energetica e anche idrica (B6-B7) di un edificio; proseguendo con la contabilizzazione degli impatti di anidride carbonica relativi alla fase di demolizione dei manufatti (C1-C2-C3-C4) e infine considerando, in maniera separata ed eventuale, tutti i benefici definiti da un approccio economico circolare (quindi di rimpiego dei rifiuti prodotti dalla demolizione) o di *off-setting* (ovvero di compensazione dell'anidride carbonica emessa tramite operazioni di afforestazione) (RICS 2023, p. 8).

La valutazione WLC di un manufatto edilizio (conosciuta anche con il termine *Whole Life Carbon Assessment*) è uno strumento applicabile a diversi momenti del processo di progettazione o costruzione di un manufatto edilizio.

Infatti, la WLCA è caratterizzata anche

da una sufficiente **flessibilità**, la quale permette allo strumento di accompagnare il progetto nei suoi diversi stadi di sviluppo (ad esempio dalla fase concettuale alla fase esecutiva).

Per questo motivo, una rendicontazione tramite approccio WLCA può essere considerato attuabile già a partire dalle **prime** fasi concettuali dell'architettura; anzi, la sua adozione già dalle sue fasi iniziali risulta essere fortemente **raccomandata** al fine di individuare, con significativa capacità, il miglior potenziale di riduzione delle emissioni di carbonio relative alle scelte progettuali prese.

Si precisa inoltre, che la capacità di decurtazione delle emissioni di anidride carbonica, ovvero la capacità di influenzare le decisioni progettuali attraverso l'impiego di una valutazione *Whole Life Carbon*, risulta essere **inversamente** proporzionale al momento della sua adozione (come dimostrato all'interno del Figura 2 a pagina seguente).

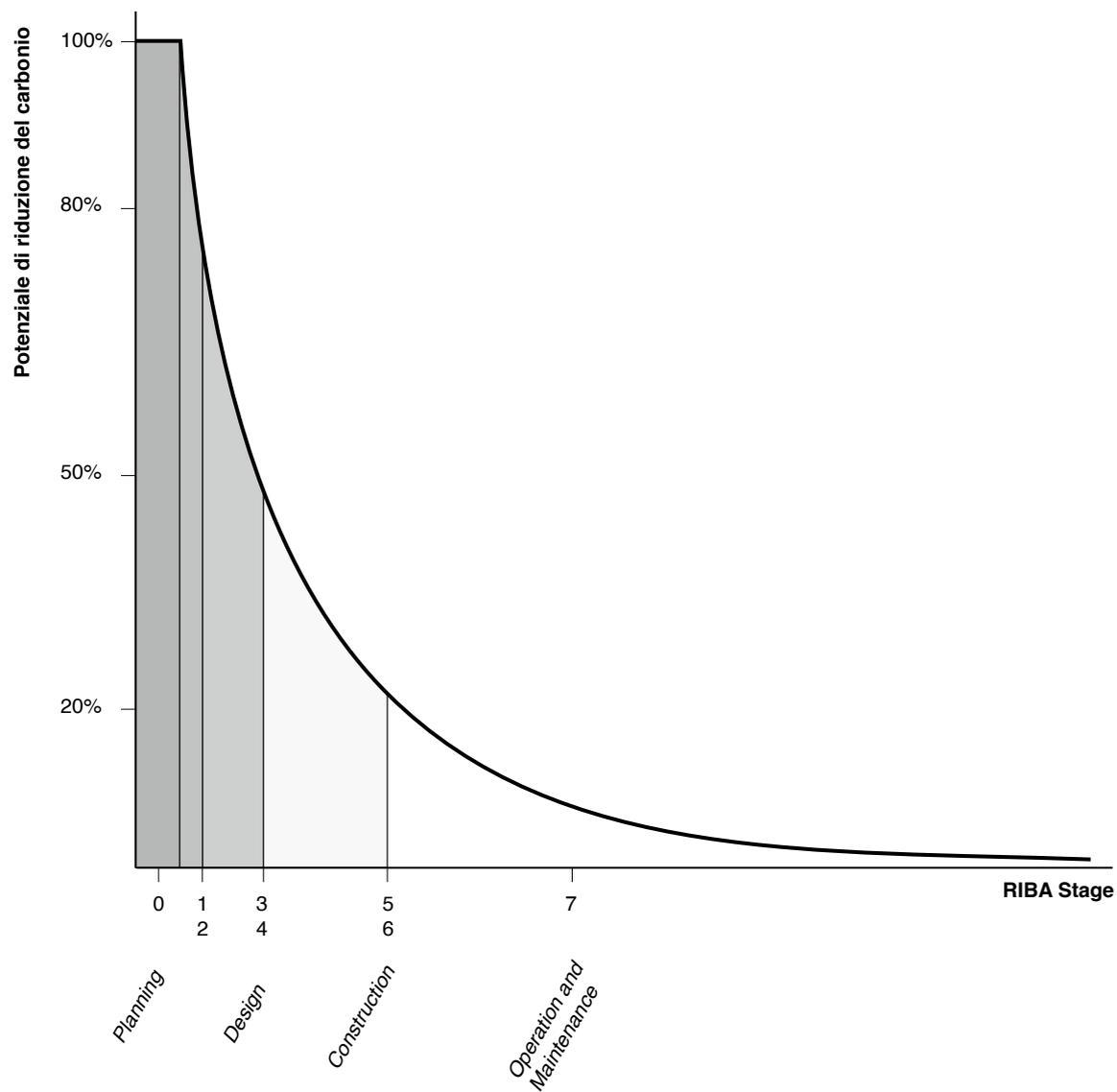


Fig.2 Potenziale di riduzione delle emissioni di Carbonio rispetto al tempo (elaborazione da parte dell'autore su fonte ISTRUCTE [40])

3. POLITICHE, STRATEGIE E STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON

All'interno del capitolo tre, si procederà con la trattazione delle principali azioni, svolte nel corso degli anni, per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni. Inoltre, tale disamina cercherà di mettere in luce anche le evoluzioni che si sono compiute negli ultimi anni in ambito politico e strategico, al fine di procedere con la diffusione e con l'introduzione, all'interno del mondo delle costruzioni, del concetto di Whole Life Carbon.

La trattazione si suddividerà secondo tre livelli scalari: dapprima si analizzeranno gli strumenti, le politiche e le strategie riscontrati a livello globale, per poi procedere con il contesto europeo e infine italiano.

3.1. CONTESTO GLOBALE

Fin dall'inizio degli anni '70, la lotta al cambiamento climatico ha richiesto a livello globale delle iniziative volte al contrasto del fenomeno, cercando di mitigare gli effetti causati essenzialmente dalle azioni antropiche come, ad esempio, eventi meteorologici estremi o aumenti di temperatura medi globali (UNEP

2023, p. 19). Se si dovessero ripercorrere le principali tappe, su scala mondiale, per la lotta al cambiamento climatico non si potrebbe non iniziare dal citare dapprima la *UN Environment Programme* (UNEP), autorità globale istituita nel 1972 a Stoccolma durante la Conferenza delle Nazioni Unite. Infatti, la UNEP rappresenta (ancora oggi) la principale autorità mondiale a svolgere un ruolo attivo per la lotta

al cambiamento climatico la quale, tramite azioni di monitoraggio e studio del fenomeno, ha il compito di garantire una cooperazione proficua tra i 193 Paesi membri, al fine di individuare e formulare delle **soluzioni percorribili** in grado di contenere il fenomeno del cambiamento climatico.

Per questo motivo, la UNEP nel corso degli anni ha svolto un ruolo chiave nella delineazione e nell'attuazione di numerose politiche, leggi e convenzioni ambientali che fossero in grado di **limitare** l'impatto antropico nei confronti della biodiversità.

Punto fondamentale, e anche lungimirante da parte della UNEP, è stata da sempre la sua volontà di riunire al suo interno non solo pareri di tipo politico, bensì soprattutto pareri tecnici scientifici, al fine di amplificare la sua capacità divulgativa sull'argomento (UNEP 2023, p. 8).

Tale tipo di cooperazione, fu conseguita dall'UNEP attraverso l'istituzione dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* ("IPCC") ovvero dell'organo intergovernativo che, istituito nel 1988, attraverso l'impiego di ricercatori provenienti da tutto il mondo redisse il suo primo storico report nell'anno 1990, spiegando alla comunità globale sia le cause che gli effetti, scientificamente comprovati, del cambiamento climatico.

Ad oggi, più che mai, l'operato svolto dall'IPCC risulta essere ancora fondamentale per la comprensione del fenomeno; si ricorda infatti che proprio lo scorso anno, ovvero nel 2022, l'ente ha pubblicato il suo sesto report incentrato fortemente sulla delineazione di **strategie di adattamento e mitigazione** del fenomeno.

Un'ulteriore data fondamentale, per lo sviluppo corale di una politica globale contro il cambiamento climatico, fu quella del 1992. Infatti, è in questa data che risale la *Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo* tenuta a Rio de Janeiro da parte delle Nazioni Unite.

In questa conferenza, si redisse la prima convenzione quadro dal nome *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), nella quale si produssero le prime iniziative corali per la stabilizzazione delle concentrazioni in atmosfera dei gas ad effetto serra equivalente.

Procedendo poi con questa delineazione cronologica, un secondo momento cruciale fu quello del 1995 in cui, i paesi aderenti all'UNFCCC si ritrovarono in quella che ad oggi è nota come COP ovvero *Conference of Parties*, organismo fondamentale delle Nazioni Unite, all'interno del quale, con cadenza annuale si riuniscono i rappresentanti dei paesi membri per negoziare accordi in merito alla lotta del cambiamento climatico. A questa data seguirono diversi accordi; si ricordano in modo particolare su tutti:

- il protocollo di Kyoto, durante la **COP3** nel 1995, all'interno del quale i paesi aderenti si impegnavano a ridurre entro il 2012 del 5% la CO_{2eq} in atmosfera rispetto ai livelli pre-industriali
- la **COP18** del 2012 tenutasi a Doha, in cui si estesero gli obiettivi del 1995 fino al 2020
- la **COP21**, con il fondamentale protocollo di Parigi, grazie al quale i paesi, che fossero rappresentati di almeno il 55% delle emissioni mondiali di CO_{2eq}, sottoscrissero un accordo

per limitare l'aumento di temperatura globale non oltre 1,5° C, rispetto ai livelli pre-industriali.

Inoltre, durante la COP21 ci fu una seconda importante iniziativa, ovvero quella riguardante la fondazione della *Global Alliance for Buildings and Construction* (GlobalABC), nata con l'intento di catalizzare le azioni strategiche in materia di **neutralità carbonica** sull'ambiente edificato (UNEP 2022, p. 5).

Difatti, la GlobalABC trova la sua ragion d'essere proprio nel cercare di permettere il raggiungimento degli obiettivi stabiliti all'interno dell' Accordo di Parigi fornendo, fin dalla loro prima delineazione, un sostegno alle politiche delle Nazioni aderenti in tema di decarbonizzazione del settore delle costruzioni.

Oltre questo, alla *GlobalABC* si richiede di **monitorare** lo stato dell'arte attraverso la restituzione di report annuali, all'interno dei quali vi è un compendio circa i progressi del settore su scala mondiale. Nell'ultimo report, pubblicato nel 2022, si può desumere come il settore abbia avuto negli ultimi due anni (ovvero quelli successivi alla pandemia scaturita dal virus COVID-19) un forte aumento in termini sia di energia impiegata sia di anidride carbonica emessa (risultato definito come *"effetto rebound"*).

Sulla base del report, la GlobalABC restituisce un panorama molto complesso per il settore delle costruzioni: il raggiungimento di una completa decarbonizzazione entro il 2050 è infatti, ad oggi, una sfida di difficile risoluzione (GlobalABC 2022, p. 16).

Proseguendo con questa trattazione su scala

procedere con l'introduzione del principale interprete che nel corso degli ultimi anni ha impiegato, forse più di tutti, i propri mezzi per la divulgazione e la trattazione del concetto di *Whole Life Carbon*, ovvero il *World Green Building Council*.

Istituito nel 1993, il movimento (nato inizialmente negli USA) ha in poco meno di un ventennio radunato oltre 75 paesi, divenendo su scala mondiale una delle maggiori organizzazioni per l'attuazione di una strategia di trasformazione del mondo delle costruzioni, contribuendo in maniera fondamentale ad un **cambiamento** e ad una evoluzione, su scala mondiale, del concetto stesso di decarbonizzazione del settore edilizio. L'operato del *Green Building*, concretamente impegnato nei confronti del cambiamento climatico tanto quanto della circolarità del settore economico e del benessere umano, trova attuazione attraverso la realizzazione di programmi globali e regionali che siano in grado di permettere una **evoluzione** del sistema odierno come, ad esempio, il programma *Net Zero Carbon Buildings*.

Il programma, nato nel 2019 è stato tra i primi ad interessarsi al concetto di WLC su scala mondiale, ponendosi l'obiettivo di iniziare ad intraprendere una collaborazione più profonda tra il settore delle costruzioni e il WGBC stesso, al fine di permettere una **rendicontazione** totale delle emissioni di CO_{2eq} connesse non più esclusivamente, o in maniera preponderante, alle fasi di utilizzo di un manufatto architettonico bensì anche alla sua fase realizzativa.

Infatti, considerando l'impatto totale in termini di anidride carbonica lungo l'intero ciclo di vita,

si permette a scala mondiale di accrescere la conoscenza in merito alla *Whole Life Carbon* degli edifici, rendendo possibile in questo modo non solo la delineazione di un **valore di soglia** concreto ma anche la delineazione di una serie di strategie per la sua diminuzione.

Per questo motivo, coloro che volontariamente accettano di inserirsi all'interno del programma, consentono sia un'accelerazione della decarbonizzazione del mondo edile (poiché collaborano ad un miglioramento generale sulla qualità dei dati desunti), sia il raggiungimento degli obiettivi concordati di lotta al cambiamento climatico.

Per concludere, si ricorda che oltre la delineazione di programmi e eventi a scala mondiale a partire dal 2016, il *WGCB* pubblica a cadenza annuale un report riassuntivo con l'intento di informare, in termini sia numerici che statistici, sull'operato compiuto dalla organizzazione nel corso dell'anno in esame.

3.2. CONTESTO EUROPEO

Dal punto di vista europeo, invece, gli sforzi in materia di decarbonizzazione da parte dell'Unione Europea sono da sempre stati caratterizzati da politiche volte a far fronte al fenomeno del cambiamento climatico attraverso un **approccio olistico e complesso**. Sebbene le prime iniziative possano essere rilevate già a partire dal 1990, si ritiene opportuno ricordare in particolar modo la *strategia 20-20-20* del 2007 all'interno della quale, si prefissò per la prima volta l'obiettivo di ridurre entro il 2020 il 20% delle emissioni di gas ad effetto serra equivalente, assieme ad un risparmio energetico del 20% e ad un

simultaneo incremento nell'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili del 20%.

A questa prima strategia nel 2016 seguì, per raggiungere gli obiettivi individuati durante la COP21, il pacchetto legislativo noto come *Clean Energy package* volto alla regolazione in termini normativi dei settori afferenti al mercato dell'energia elettrica, delle fonti rinnovabili e della efficienza energetica tramite specifiche misure legislative (come ad esempio la direttiva nota come *RED II*, nata per definire dei nuovi obiettivi in merito alla produzione di energia proveniente da fonti rinnovabili).

Ulteriore tappa fondamentale per l'Unione Europea fu quella del 2019, quando decise di produrre una nuova iniziativa strategica definita come *Green Deal Europeo*, in cui il Parlamento Europeo ribadì in maniera ancor più decisa, attraverso un nuovo pacchetto di decreti e investimenti, riassunti in quello che viene definito come *Fit for 55*, la necessità di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050, rispettando così gli accordi presi a Parigi (all'interno della già discussa COP21).

Per questo motivo, all'interno di tale pacchetto, nel corso del 2021 sono state emanate ben 12 iniziative, su tutte il regolamento UE/2021/1119 il quale dichiarava la necessità da parte dei paesi dell'UE di ridurre ulteriormente il livello delle loro emissioni di CO_{2eq} entro il 2030, passando dal 40% (come dichiarato precedentemente dai regolamenti 2018/1999/UE e 2018/842/UE) al 55% (rispetto ai valori del 1990) contribuendo così sia all'ottenimento di un parco edilizio completamente decarbonizzato entro il 2050 sia ad una **profonda revisione** degli strumenti normativi fino a quel momento

impiegati (GBC Italia 2022c, pp. 11-14).

Entrando ancor più nello specifico, una *milestone* fondamentale per la decarbonizzazione del mondo delle costruzioni avvenne per la prima volta nel 2010. Infatti, in quell' anno, il Parlamento Europeo decise di promuovere una nuova tipologia di direttiva che oggi prende il nome di EPBD, ovvero di *Energy Performance Buildings Directive*, finalizzata al raggiungimento di **obiettivi concreti**, sia in termini energetici sia ambientali del patrimonio edilizio esistente (Commissione Europea 2021).

La suddetta norma, però, ha subito negli anni delle profonde e sostanziali modifiche da parte del Parlamento Europeo, rendendo necessari a partire dal 2010 (con la originaria direttiva 2010/31/UE) ben quattro *recast*, con l'intento di implementare la portata in tema di sostenibilità della direttiva stessa più profonda e innovativa.

Per questo motivo, ad oggi, la EPBD rappresenta sicuramente uno dei tasselli chiave del già citato pacchetto *Fit for 55%*, poiché si contraddistingue per il suo impegno nella decarbonizzazione del settore edile, grazie al suo interesse sia nel fissare dei **livelli minimi** di prestazione energetica degli edifici sia nel richiedere agli Stati membri la pianificazione di strategie per la decarbonizzazione del parco immobiliare, attraverso approcci a medio o lungo termine (come, ad esempio, le strategie per la ristrutturazione dell'esistente) (Commissione Europea 2021, pp. 2-7).

Seppur la normativa citata è da sempre stata caratterizzata da un approccio innovativo in merito alle problematiche ambientali del

mondo edile, in questa sede si procederà in particolar modo a trattare della *recast* emanata a Bruxelles dal Parlamento Europeo il 15 dicembre 2021. Infatti, all'interno di questo *recast*, la EPDB ha introdotto per la prima volta il concetto di *Whole Life Carbon*, con l'intento di **ampliare** il campo di applicazione del concetto di decarbonizzazione, al fine di associarlo non più soltanto alla fase operativa del manufatto, ma di applicarlo al suo intero ciclo di vita, considerando così anche le emissioni associate a tutte le fasi descritte dalla EN 15987, come ad esempio la CO_{2eq} associata alla produzione, al trasporto, alla manutenzione o allo smaltimento dei rifiuti provenienti da azioni di demolizione.

Questo concetto, che potrebbe sembrare intuitivo, è in realtà un punto fondamentale per la delineazione di un nuovo quadro politico europeo, che sia in grado di realizzare dei nuovi standard tecnici e delle nuove linee guida capaci di conteggiare in maniera affidabile l'impronta di carbonio incorporata da un progetto, associandola non più soltanto alla sua fase di uso, quindi al suo momento operativo, bensì all' **interezza** del suo ciclo di vita.

Ciononostante, è importante ricordare come, ad oggi, non sia ancora presente una metodologia o uno schema di applicazione condiviso a livello europeo o presentato all'interno della normativa. Infatti, ciò che si può rilevare oggi, all'interno del settore, è la presenza di una serie di iniziative nazionali che, anche in maniera privata, stanno **contribuendo** a fornire un bagaglio di esperienze fondamentali per la formazione di un pensiero comune e condiviso in merito alla rendicontazione delle emissioni della WLC (BPIE 2022c, p.5).

In termini pratici, come descritto dal *Buildings Performance Institute Europe* (BPIE), all'interno del report pubblicato nel 2022 dal titolo *How to embed Whole Life Carbon in the EPBD* (BPIE 2022c), un conteggio delle emissioni nette di carbonio per tutto il ciclo di vita permetterà di **rendicontare** il quantitativo di *budget* di carbonio rimanente per il non superamento della soglia di 1,5° C, che secondo l'Istituto ad oggi si attesterebbe intorno ai 12-15 Gt di CO₂.

Così facendo, gli Stati membri si doteranno di uno strumento dinamico, in grado di monitorare i progressi in ambito climatico relativi al mondo delle costruzioni. Naturalmente, questo comporta anche la necessità di intraprendere delle azioni drastiche e immediate, da assumere con l'intento di rendere più agile e percorribile la **conversione** prestazionale degli edifici durante il loro intero ciclo, cercando di decurtare il più possibile il quantitativo corrispondente alle emissioni associate ad esempio alla fase di costruzione che, a differenza delle emissioni afferenti alla fase operativa, sono molto spesso complesse da ridurre (BPIE 2022c, p.13).

Ciò che quindi dovrebbe avvenire nelle future revisioni della direttiva EPDB, secondo il parere del BPIE, dovrebbe essere una evoluzione della normativa, tale da permettere la definizione di un nuovo quadro operativo europeo che risulti capace di dare sostegno agli Stati membri nell'aggiornamento dei loro standard edilizi nazionali.

In tal modo si **incentiverebbe** non soltanto la ricerca, ma anche la realizzazione di nuovi edifici che non siano più degli edifici ad

energia quasi zero, ma veri e propri edifici a *Net Zero Whole Life Carbon*, riducendo così, il più possibile, le emissioni legate all' *Operational Carbon* ma, soprattutto, quelle relative all' *Embodied Carbon* (BPIE 2022c, p.11).

Per questo motivo, come evidenziato dal report del BPIE, il percorso che porterà l'Unione Europea alla neutralità climatica dovrà essere, almeno nelle sue fasi iniziali, caratterizzato da una forte ricerca e analisi circa i dati esistenti sugli edifici. In una parola sarà richiesta un'azione di *benchmark*, per passare così ad una seconda fase, all'interno della quale agli Stati membri sarà richiesto di stabilire delle soglie di requisiti sì ambiziose, ma anche **coerenti e percorribili** (BPIE 2022c, p.5).

Nel dettaglio, l'Istituto BPIE nel suo ultimo report redatto, propone una roadmap specifica per la realizzazione dei nuovi edifici, cadenzata da tre tappe fondamentali: **2020, 2025, 2036** (Fig.3).

Sorvolando in merito al primo step (in cui si attesta la necessità di realizzare dei nuovi edifici, a partire dal 2020, caratterizzati da delle emissioni operative prossime allo zero), si procede alla trattazione specifica dei due successivi step, in cui l'Istituto propone l'ambizioso traguardo di essere in grado, dapprima entro il 2025, di vantare un parco edilizio di nuova costruzione a *Net Zero Operational Carbon*, ovvero di ottenere delle città che siano caratterizzate da nuovi edifici ad emissioni pari a zero durante la loro fase di utilizzo.

Successivamente invece, la roadmap propone un terzo *step* in cui, a partire dal 2036, il settore delle costruzioni (su scala europea)

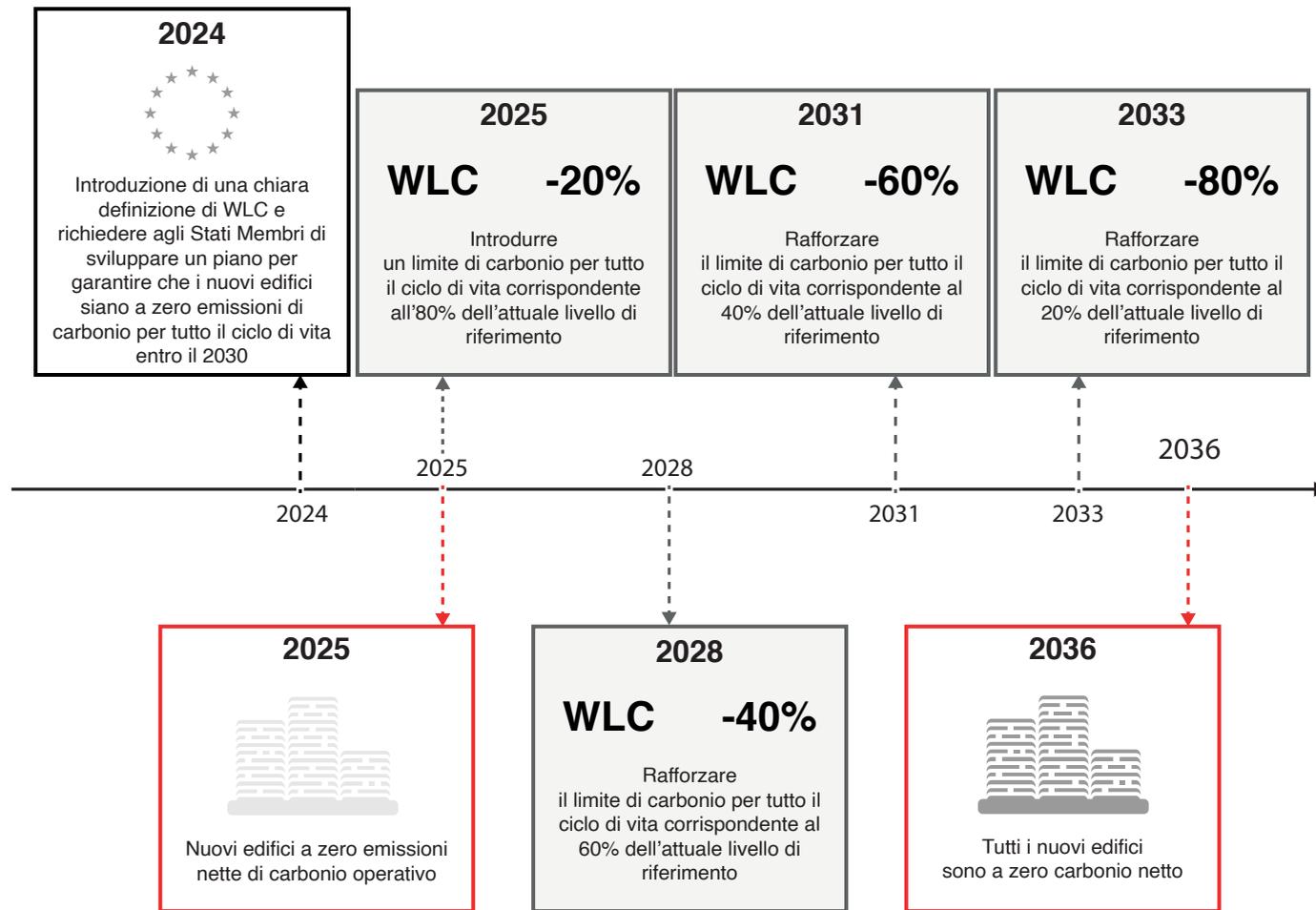


Fig.3 Calendario indicativo per l'introduzione di requisiti in tema WLC (elaborazione da parte dell'autore su fonte BPIE [7])

dovrà essere in grado di realizzare dei nuovi manufatti architettonici caratterizzati da un impatto, in termini di anidride carbonica, pari a zero durante l'intero ciclo di vita (*Net Zero Whole-Life Carbon*).

Inoltre, come si può dedurre da diversi

articoli presenti nella nuova *recast*, gli obiettivi in merito alla decarbonizzazione dei nuovi edifici, (ma naturalmente anche quelli riguardanti la città edificata) sono di possibile attuazione se e soltanto se accompagnati da una proficua elaborazione di nuove misure e **nuovi strumenti** da parte degli Stati membri, i quali dovranno

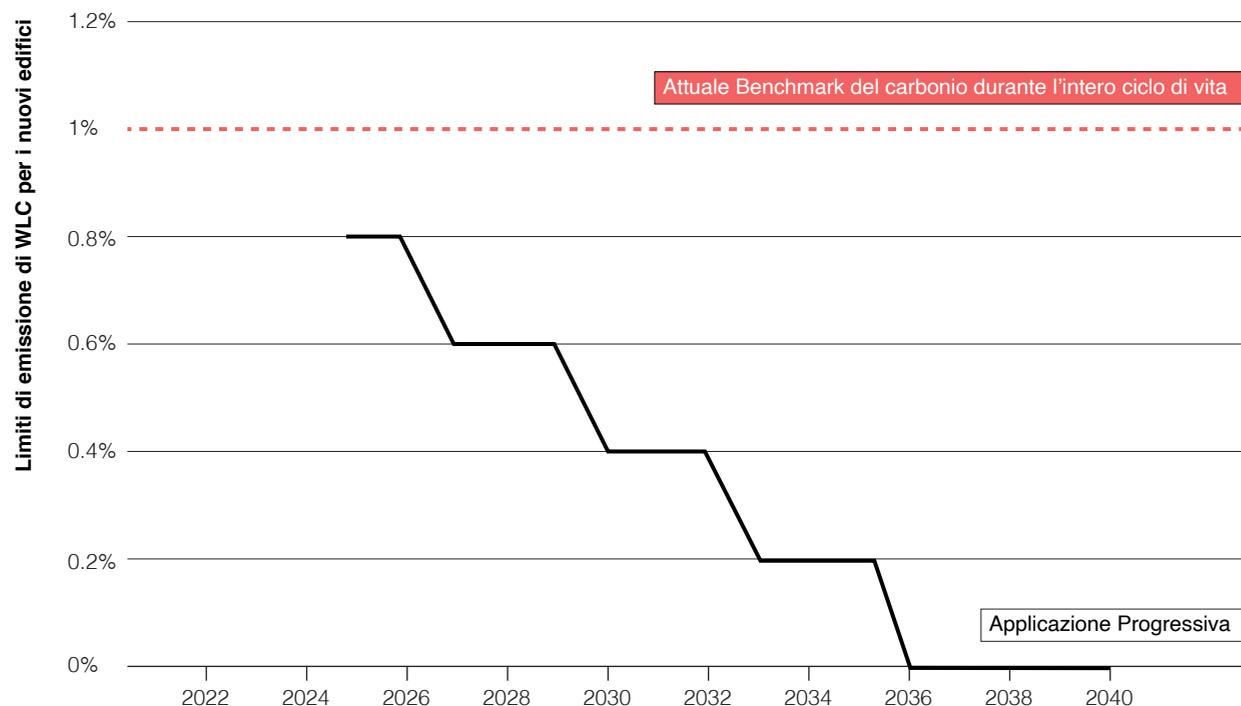


Fig.4 Esempio di applicazione progressiva di limiti sulla Whole Life Carbon per i nuovi edifici (elaborazione da parte dell'autore su fonte BPIE [6])

essere in grado di assecondare il cambiamento, di alimentare una domanda di mercato e, al contempo, di garantire un valido monitoraggio al tessuto architettonico delle città.

A tal proposito, una delle disposizioni presentate nell'ultima EPDB è quella relativa ai Piani nazionali di riqualificazione edile (art.3), in cui agli Stati membri viene richiesta la sottoscrizione di un piano che sia in grado di caratterizzare le operazioni di ristrutturazione attraverso delle **tappe vincolanti** alle quali corrisponderanno, di conseguenza, valori di emissioni massimi. Proprio questo meccanismo sarà in grado di innescare un comportamento virtuoso nel settore che, in maniera graduale,

potrà portare ad un parco immobiliare (di nuova costruzione e non) dalle emissioni di anidride carbonica pari a zero entro il 2050.

Una seconda azione, per una diminuzione delle emissioni, è quella di rendere ancor più stringenti gli Standard minimi di prestazione (art.9).

Infatti, questi standard dovranno essere ripensati da parte degli Stati, al fine di stabilire delle soglie minime che non tengano conto soltanto dell'efficienza energetica dell'edificio ma, altresì, di quella che la norma definisce come impronta di carbonio, al fine di **ottimizzare** anche tutte quelle operazioni ed azioni svolte, ad esempio, per un ordinario intervento di

miglioramento in termini di fabbisogno termico dell'edificio. Queste soglie, come spiegato dalla direttiva, non dovrebbero però essere delle soglie statiche, bensì dei *threshold* caratterizzati da una **dinamicità** che consenta alle soglie di innalzarsi nel tempo e di allinearsi anche con le *milestones* individuate dai piani nazionali sopracitati (Fig. 4).

Un terzo strumento, che necessariamente dovrà essere aggiornato nel breve periodo sarà quello degli EPC, ovvero Energy Performance Certificate (art. 16, 17, 18, 19), poiché sarà in particolare questo lo strumento prediletto per la divulgazione dei dati inerenti al carbonio nell'intero ciclo di vita e per il collazionamento di questi dati in apposite banche-dati, le quali, a loro volta, forniranno informazioni utili e impiegabili, per i piani di ristrutturazione nazionale e per le azioni di **monitoraggio** dei progressi relativi alla decarbonizzazione del mondo delle costruzioni. Per quel che concerne questi ultimi articoli, è doveroso integrare all'interno della trattazione la revisione approvata dal Parlamento Europeo il 14 marzo 2023.

La nuova implementazione della EPDB ha comportato una parziale modifica degli articoli riguardanti gli EPC, conservando però la sua attenzione esclusivamente alla fase di *operational*. Nel dettaglio, le nuove modifiche riguardo agli EPC, richiedono una ristrutturazione degli edifici con la certificazione di prestazione energetica più bassa (Classe G), al fine di raggiungere entro la fine del 2030, almeno la classe F ed entro il 2033 la classe E. Inoltre, la direttiva prevede che, al fine di conseguire **un'armonizzazione** delle classi energetiche tra gli Stati membri, la nuova classe G dovrebbe corrispondere al 15% del parco

immobiliare nazionale caratterizzato dalle prestazioni energetiche peggiori, mentre per quel che riguarda la certificazione di classe A, questa verrebbe applicata esclusivamente per edifici a zero emissioni di CO_{2eq} durante la fase di Uso e, qualora gli edifici a zero emissioni contribuissero alla rete elettrica, grazie all'impiego di fonti rinnovabili, questi dovrebbero essere detentori di un certificato di prestazione energetica di classe A+ (Parlamento Europeo 2023, p. 1).

Un ulteriore strumento proposto all'interno dell'EPBD, è poi quello del Passaporto di rinnovamento (art.10), ovvero di un attestato che sia in grado di contribuire all'attuazione degli standard previsti, di schedulare le operazioni di ristrutturazione da effettuare su un edificio "x" e, infine, di eliminare gli edifici con le prestazioni energetiche peggiori, grazie ad un livello conoscitivo più profondo dell'esistente.

A conclusione dell' EPDB, si ricorda che, come asserito dalla BPIE, la sudetta direttiva europea rappresenta un vero e proprio momento fondamentale per la riduzione delle emissioni di carbonio nell'intero ciclo di vita del settore edilizio, poichè introduce concetti e strumenti fortemente innovativi. Allo stesso tempo però, ciò che emerge è la **mancanza** di un quadro politico coerente e condiviso, in grado di attuare delle azioni corali e condivise e non esclusivamente afferenti a qualche paese. Di fatti, il processo per la decarbonizzazione dell'intero ciclo di vita di un manufatto edilizio, necessita di una metodologia chiara e applicabile da tutti gli Stati membri, al fine di sottostare agli obiettivi di neutralità climatica previsti e di non incorrere in ulteriori danni all'ambiente (BPIE 2022c, pp. 11-14).

Infine, si procede con l'introduzione di uno degli strumenti europei più importanti per la certificazione di sostenibilità di un edificio, ovvero Level(s). Infatti, lo strumento Level(s), lanciato il 15 ottobre 2020, rappresenta un passaggio **fondamentale** per l'ottenimento di un linguaggio comune europeo sulla rendicontazione delle emissioni legate al ciclo di vita degli edifici, assicurando anche un supporto al progettista al fine di ottenere il miglior risultato progettuale possibile.

Level(s), nato come risposta alle richieste sorte dall'Accordo di Parigi, attraverso l'impiego dello standard CEN/TC 350 è giunta alla delineazione di alcuni **indicatori chiave** di sostenibilità che, con l'approvazione da parte del settore edilizio, hanno il compito di attuare una valutazione del ciclo di vita che sia comprensiva di alcuni parametri come, ad esempio: le emissioni di anidride carbonica, i materiali impiegati, l'utilizzo dell'acqua, la sostenibilità sociale ed economica, oltre che, naturalmente, la sostenibilità ambientale di un progetto.

Lo strumento, oggi ancora del tutto volontario, mira non solo a sviluppare un approccio comune basato sugli standard europei, ma anche a quello di fornire **consigli e supporto** al necessario sviluppo delle procedure di certificazione proprie degli Stati membri all'UE, garantendone così la loro efficienza ed efficacia nel tempo (Commissione Europea, 2023).

3.3. CONTESTO NAZIONALE

Il contesto nazionale italiano sulla decarbonizzazione del settore delle costruzioni è figlio delle direttive e delle misure vigenti a

livello europeo dove, in alcuni casi, il recepimento delle stesse è avvenuto con tempistiche non sempre allineate a quelle degli altri Stati membri dell'Unione.

Premessa cruciale, prima di passare all'analisi delle singole direttive italiane adottate nel corso degli ultimi anni, è quella riguardante il quantitativo di emissioni di CO_{2eq} che, attraverso l'ausilio dei dati forniti da parte di *ISPRA, Eurostat, Enea e GSE*, sono state registrate all'interno dell'*Italy Climate Report 2022* (I4C 2022). Infatti, come riportato dal report, si attesta che nel 2021 in Italia si è contato un totale di 418 tonnellate di CO_{2eq}, riportando quindi un taglio delle emissioni del 20%, rispetto all'anno 1990.

Nonostante questo risultato, si deve precisare che, sulla base dei dati più aggiornati, il processo di decarbonizzazione (tra il periodo che va dal 2014 al 2022) risulta essersi quasi **arenato**, registrando nell'ultimo quinquennio una diminuzione di appena 15 MtCO_{2eq} (I4C 2022, p. 11).

Per questo motivo *l'Italy for Climate* (I4C), nel corso del 2023 ha pubblicato un aggiornamento del percorso per la decarbonizzazione italiana, riscontrabile all'interno del documento *La Roadmap per la neutralità climatica dell'Italia* (I4C 2023). In questo documento, infatti, l'I4C spiega come sia **imprescindibile** non solo la formulazione di nuovi piani locali di neutralità climatica, ma anche di adottare una nuova legge per il clima che sia in grado di restituire al settore delle costruzioni un quadro normativo chiaro, capace di massimizzare quelli che sono i ritorni sia in termini ambientali (abbattendo le emissioni

Tematica	Obiettivo Italiano nel PNIEC	Obiettivo UE
Riduzione complessiva di gas serra	-33% rispetto al 2005	-55% rispetto al 1990
Produzione Energetica da FER	30%	32%
Riduzione consumi di energia primaria rispetto allo scenario 2007	43%	32,5%

Tab.5 Principali obiettivi del PNIEC (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [18])

entro il 2030 del 55%) che economici. Inoltre, nel report si asserisce anche la necessità di accelerare, all'interno del settore, il processo di transizione ecologica spingendo alla realizzazione di interventi di risparmio energetico che prevedono l'impiego di tecnologie ad alta efficienza e la "solarizzazione" di tutte le superfici idonee, al fine di ottenere un aumento dell'energie rinnovabili del 63% e, conseguentemente, un abbattimento della quota relativa al consumo di energia operativa del 14%, sempre entro il 2030 (I4C 2023, pp. 13-15).

Addentrando invece all'interno della realtà legislativa, una delle più importanti e recenti attuazioni da parte del Parlamento italiano è quella relativa al D.lgs 2020/48 che recepisce le disposizioni contenute nella già citata EPDB (European Commission 2021). Grazie all'emanazione di questo decreto l'Italia si pone l'obiettivo di stabilire diversi criteri e misure, finalizzati al contenimento delle emissioni dei gas ad effetto serra attraverso l'attuazione sia di **nuove strategie nazionali** per la ristrutturazione del parco immobiliare esistente, sia attuando un processo di ampliamento in merito alla diversificazione energetica. Il quadro normativo italiano in tema di efficienza energetica ha avuto negli

anni anche ulteriori e fondamentali sviluppi per la sua graduale decarbonizzazione, come ad esempio il D.M. del 26 giugno 2015 (comunemente chiamato *Decreto Ministeriale dei requisiti minimi*), in cui si è definito in maniera compiuta la modalità di presentazione e i nuovi requisiti richiesti per il rilascio della cosiddetta APE, ovvero attestato di prestazione energetica. Sempre all'interno dello stesso decreto, vengono poi definite in maniera pratica anche le caratteristiche da dover rispettare per la realizzazione di un edificio "nZEB" ovvero di un manufatto ad energia quasi zero, richiedendo il rispetto di alcuni valori minimi, come ad esempio: l'Energia primaria non rinnovabile e totale (EP_{gr}) in kWh/m², il Coefficiente di scambio termico per trasmissione medio globale ($H'T$) sempre in kWh/m², l'Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est}/A_{sup,utile}$) o ad esempio i limiti di Trasmittanza degli elementi disperdenti opachi e trasparenti (U) W/m²k (Ministero Italiano 2015, Allegato 1).

Oltre ciò è fondamentale ricordare come da parte dell'UE sia richiesto agli Stati Membri di siglare anche i cosiddetti PNIEC (Tab. 5), ovvero *Piani Nazionali Integrati per l'Energia e il Clima*. All'interno di tale piano, pubblicato nel 2020 da parte dei *Ministeri dello Sviluppo Economico, dell'Ambiente e delle Infrastrutture*

e *Trasporti*, l'Italia si è impegnata ad aggiornare gli obiettivi nazionali per il 2030, ambendo a dei risultati soddisfacenti in materia di efficienza energetica, di produzione di energia da fonti rinnovabili e, infine, di riduzione del carico inquinante nazionale (GBCItalia 2022c, pp.14-15). Un secondo piano di tipo politico impiegato per la trasformazione e per la decarbonizzazione dell'intero settore economico italiano, è poi il cosiddetto PNRR (ovvero Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza), approvato nel 2021 dal Parlamento italiano.

Questo Piano ha permesso di accedere ai fondi stanziati, a seguito della pandemia, dall'Unione Europea all'interno del regolamento *Next Generation EU*. Il PNRR, ad oggi costituisce il principale strumento per l'attuazione di una **transizione** che riesca ad aggiornare per interezza il sistema italiano. Composto da 6 differenti missioni, il Piano si pone all'interno della missione 2 e della componente 3 (M2C3), l'obiettivo di attuare un miglioramento del tessuto edilizio esistente sotto il punto di vista energetico, attraverso l'introduzione, da parte dello Stato, di nuove forme di finanziamento temporaneo che si affiancheranno agli incentivi, fino ad oggi concessi, per mezzo dell'*EcoBonus10%*.

Oltre questo, all'interno della missione, l'Italia si pone anche di concretizzare dell'operazioni di mitigazione nei confronti del rischio idrogeologico del Paese, rafforzando le capacità di **prevenzione e di monitoraggio** degli effetti dovuti dal cambiamento climatico, e abbassando così il livello di vulnerabilità del territorio (Presidenza del Consiglio dei ministri 2022, pp. 145-148; pp. 150-153).

Perciò, come si può evincere dalla trattazione di dei diversi piani, oggi non si ricontra un concreto interessamento da parte della nostra nazione nei confronti del concetto di *Whole Life Carbon*.

Difatti, questa visione finora ha contribuito all'adozione in Italia di strumenti e piani in grado di prediligere esclusivamente il concetto di *accounting* delle sole emissioni di natura operativa, o per ancor meglio dire, di prediligere azioni volte ad un'efficienza di tipo energetico, non curante dei materiali impiegati ma interessata in maniera preponderante soltanto al concetto di minor impiego di risorse energetiche possibile per il soddisfacimento di determinate esigenze (ad esempio, di fabbisogno di energia termica).

Unica eccezione riscontrata all'interno del panorama italiano in questo lavoro di Tesi, è rappresentata dall'operato di *Green Building Council Italia* (GBC Italia), la quale, attraverso varie iniziative e progetti (su tutti quello di *#BuildingLife*), si adopera da anni con l'intento di **sensibilizzare** il settore delle costruzioni italiano ai temi della sostenibilità, aggiornandone tematiche ed obiettivi e allineandosi con le ricerche e gli sviluppi, che soprattutto in tema di *Whole Life Carbon*, si stanno ottenendo in altri paesi europei.

Nel dettaglio, data l'importanza del lavoro svolto nel panorama italiano dalla *Green Building Council* si è deciso di trattare, all'interno di questa tesi, il suo operato separatamente e all'interno del paragrafo 4.5. *Italia* (p. 50).

4. INIZIATIVE IN AMBITO EUROPEO A TEMA WHOLE LIFE CARBON

All'interno del capitolo quattro, si esamineranno le più recenti iniziative che in questi anni i paesi dell'Unione Europea e no (vedi il caso della Gran Bretagna) hanno sviluppato o stanno sviluppando per adeguarsi alle nuove direttive europee in tema di decarbonizzazione del settore edilizio.

Se ad oggi si possono riscontare diverse e molteplici azioni riguardanti l'adempienza ai requisiti di efficienza energetica, lo stesso non si può affermare sulla formulazione di metodologie in grado di compiere un adeguato accounting del carbonio nell'intero ciclo di vita (o meglio, della Whole Life Carbon), il quale è realmente oggetto di studio solo da parte di alcuni paesi europei, che possiamo definire come pionieri del settore (BPIE 2023, p. 4).

Questa sezione, avrà quindi lo scopo di tracciare una linea delle politiche europee più avanzate, presentandole non solo come fonte di ispirazione ma come vere e proprie best practices da seguire. Inoltre, la trattazione di queste politiche europee servirà anche per poter delineare in maniera critica ed obiettiva quelli che sono gli sforzi fin qui condotti dal nostro Paese.

Per poter effettuare questa azione di sintesi sulle iniziative europee, è stato fondamentale il report condotto dalla società Rambool e dall'Università belga KU Leuven pubblicato nell'ottobre del 2022 e dal titolo Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings (Rambool, KU Leuven 2022), all'interno del quale sono mostrate differenze e somiglianze degli specifici strumenti nazionali per la riduzione delle emissioni incorporate durante l'intero ciclo di vita di un manufatto architettonico, andando ad evidenziare gli ambiti di applicazione di ciascun Paese, i metodi seguiti per la rendicontazione e i valori minimi applicati in termini di kgCO_{2eq}.

Si specifica, inoltre, che tutti i modelli che seguiranno all'interno di questa sezione sono modelli

standardizzati rispetto alla norma, citata già più volte, EN15978:2011 che, seppur caratterizzata da una chiara ed evidente vocazione, lascia al contempo una sufficiente flessibilità, la quale giustifica le differenze rilevate ed analizzate in questa sede nelle diverse politiche nazionali adottate. Oltre la EN15978:2011, ciascuno dei Paesi oggetto di studio ha basato il proprio metodo di calcolo adempiendo anche a quanto richiesto dallo strumento volontario europeo cardine in tema di valutazione della sostenibilità di un progetto, ovvero Level(s) (strumento già analizzato all'interno del Capitolo 3. Politiche, strategie e strumenti per la valutazione Whole Life Carbon) (Rambool 2022, pp. 10-12).

Nello specifico i casi europei analizzati saranno quelli della Francia, della Danimarca e della Svezia per poi passare al Gran Bretagna e infine all'Italia.

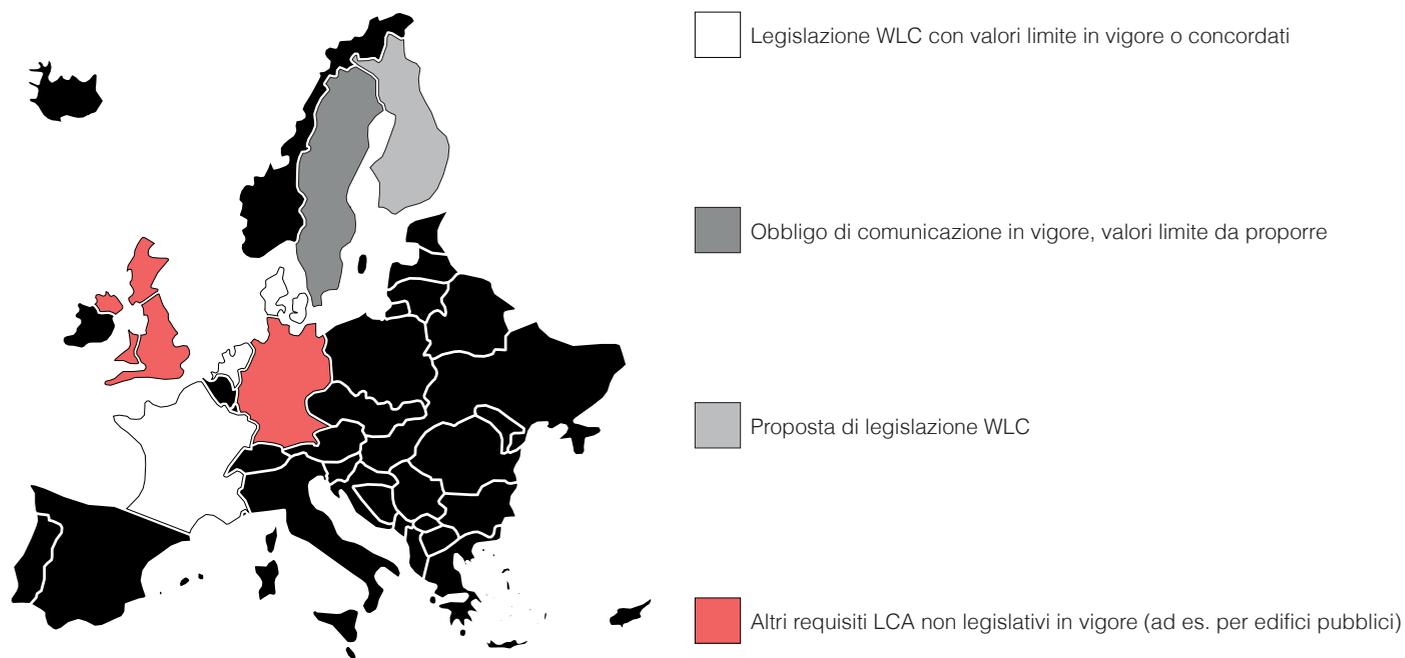


Fig.6 Stato della legislazione europea in tema di WLC e LCA (elaborazione da parte dell'autore su fonte Rambool [30])

4.1. FRANCIA

Nel territorio francese il settore edilizio rappresenta circa il 25% delle emissioni nazionali di gas ad effetto serra. Al fine di incentivare un cambiamento il più possibile rapido il governo francese, nel 2020, ha pubblicato la nuova legge nazionale in tema di edilizia sostenibile che prende il nome di *Règlementation environnementale* (RE2020) la quale evolve la vecchia RT2012 che si basava, naturalmente, sulla precedente versione della EPBD (Agora Energy Transition 2022).

È importante ricordare come l'adozione del regolamento sia solo il risultato di un processo di **preparazione** incominciato all'inizio del 2017 grazie al programma pilota "E+C-", il quale aveva il compito di premiare i progetti architettonici francesi che fossero andati oltre i requisiti minimi di legge sulle emissioni di anidride carbonica nella fase operativa del manufatto, al fine di incentivare e dare riconoscimento agli sforzi compiuti da parte del settore delle costruzioni francese (BPIE 2023, p.26).

Nello specifico, la normativa RE2020, ha l'obiettivo di rendere più severi i nuovi standard circa le prestazioni energetiche dell'edificio, ma non solo: infatti la RE2020 si interessa anche del concetto di quelle che all'interno del documento *Reducing Embodied Carbon In New Buildings: RE2020 in France* (Agora Energy Transition 2022) vengono definite come emissioni totali, ovvero le emissioni incorporate dalle componenti edilizie durante l'intero ciclo di vita. Sempre all'interno dello stesso documento, si può leggere come l'obiettivo di questa normativa sia quello di fornire gli **strumenti** adatti alla rendicontazione di un'impronta di

carbonio che, oltre a considerare le emissioni che vanno dalla costruzione iniziale alla demolizione finale, sia in grado di contabilizzare anche le emissioni dovute dal consumo di energia elettrica soprattutto durante la stagione estiva, al fine di permettere uno studio circa la necessaria decarbonizzazione delle fonti di energia impiegate.

Inoltre, la RE2020 adotta un modello di conteggio delle emissioni definito dinamico ovvero una valutazione LCA che sia in grado di contabilizzare anche l'impatto dello **stoccaggio** del carbonio biogenico di materiali a base legno, al fine di incentivare un approccio *circular*, in grado di incoraggiare un efficientamento all'interno della filiera di produzione di legname francese.

Nel dettaglio, la normativa (entrata in vigore dal gennaio del 2022) è solo il risultato di un processo di indagine condotto su più di 1000 edifici di nuova realizzazione, svolto con l'intento di poter effettivamente testare la metodologia di calcolo WLCA e contemporaneamente arricchire il *database* di riferimento, fondamentale per poter poi ipotizzare delle azioni di **miglioramento** in senso olistico nel corso del tempo.

Nella fattispecie, la RE2020 fornisce dei veri e propri valori limite di $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$, i quali non sono uguali per tutti i progetti a tema residenziale, poiché essi **differiscono** dalla tipologia edilizia (se unifamiliare o plurifamiliare), dalla consistenza del sottosuolo e dalla localizzazione geografica (Agora Energy Transition 2022, pp. 2-5). Un quadro complessivo di questi valori, i quali si riducono al ritmo di ogni 3 anni fino al 2030, è proposto all'interno del documento

	Case Unifamiliari	Case plurifamiliari
2022-2024	640 kgCO ₂ /m ²	740 kgCO ₂ /m ²
2024-2028	530 kgCO ₂ /m ²	650 kgCO ₂ /m ²
2028-2030	475 kgCO ₂ /m ²	580 kgCO ₂ /m ²
Dal 2031	415 kgCO ₂ /m ²	490 kgCO ₂ /m ²

Tab.7 Valori limite approvati all'interno della RE2020 (elaborazione da parte dell'autore su fonte Rambool [33])

realizzato dalla Rambool e dalla KU Leuven. La tabella qui sopra riportata presenta alcuni punti che si ritiene in questa sede fondamentale trattare; infatti, è proprio all'interno di questa che si può desumere la traiettoria generale che il governo francese intende dare alle sue politiche in ambito di decarbonizzazione del settore edilizio.

Questi requisiti progressivi nascono dalla necessità di appropriare l'intero settore di strumenti validi, che siano testati il prima possibile al fine di innescare un fenomeno di abbattimento dell'emissione il più rapido ed efficiente possibile, cercando in contemporanea di incentivare un **nuovo mercato** e un nuovo tipo di industria il più possibile locale. Al termine di questa prima fase, che terminerà con un utilizzo consapevole e sicuro degli strumenti di valutazione (i quali si ricorda ad oggi ancora assenti a livello nazionale), subentrerà una seconda fase, in cui i requisiti saranno più **stringenti** fino ad arrivare ad un abbassamento di oltre il 30%, rispetto alla situazione odierna, entro il 2031 (Tab. 7). Per quanto riguarda tutti i parametri più tecnici, che sono considerati come parametri chiave per la realizzazione di una valutazione basata su di un approccio LCA

da parte della RE2020, vale quanto segue: il periodo di riferimento del calcolo è da considerarsi di 50 anni, l'unità metrica impiegata per la rendicontazione è la superficie netta abitabile ovvero quella superficie ottenuta dalla esclusione di muri, garage e locali a temperatura esterna o di altezza inferiore a 1,80 m; oltre questo al momento del calcolo viene presa in considerazione ogni componente edilizia permanente, al fine di restituire un valore di *output* che è da intendersi in kgCO₂/m².

Ulteriori requisiti fondamentali per il calcolo, sono poi la contemplazione della banca dati francese INIES, all'interno della quale vengono raccolte certificazioni EPD specifiche, e i cui dati possono essere impiegati all'interno del software ELODIE, sviluppato da parte del *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), il quale risulta essere lo strumento francese **principale** per il calcolo della componente di carbonio di un manufatto architettonico secondo le specifiche richieste nella RE2020.

Inoltre, la metodologia proposta dalla normativa si applica a tutti gli edifici di nuova costruzione rientranti nelle seguenti categorie: edifici residenziali, per uffici e scolastici.

Si ritiene opportuno poi specificare che, come presentato all'interno della RE2020, a partire dal 2022 è obbligatorio presentare da parte del committente, al momento di richiesta per il rilascio di un permesso a costruire, una **valutazione preliminare** circa l'impatto in termini di CO_{2eq} dell'edificio da realizzare. Infine, tale documento (da fornire nella sua versione definitiva e adempiente ai requisiti prescritti) sarà poi ripresentato a conclusione del cantiere all'autorità locale, la quale sarà il soggetto responsabile per la valutazione della veridicità delle informazioni presentate (Rambool 2022, pp. 32-36).

4.2. DANIMARCA

Per quanto concerne il caso danese, è innanzitutto fondamentale riconoscere che è da diversi anni che il governo sta effettuando degli importanti sforzi in tema di sostenibilità. Difatti, è già a partire dal 2014 che in Danimarca si sta proponendo un continuo sviluppo della legislazione in tema ambientale e di efficienza energetica poiché, proprio in quell'anno, la nazione incominciò dapprima a formulare delle versioni di certificazioni ambientali specifiche per gli edifici (sul modello della certificazione tedesca DGNB), per poi cominciare, a breve distanza, con la formulazione di diverse classi di attestato; al fine di certificare in maniera **obiettiva** la sostenibilità dell'intervento architettonico proposto.

Oggi, il governo danese ha adottato un nuovo sistema strategico nazionale per la diffusione di buone pratiche nel settore dell'edilizia sostenibile, le quali pratiche constano di diversi *layers* di lettura al fine di restituire una visione olistica della tematica.

L'obiettivo cardine di queste, infatti, è quello di essere in grado di **promuovere** un settore delle costruzioni il più efficace possibile efficientando al massimo il consumo di energia e di materiale e incentivando soluzioni di tipo circolari.

Così facendo, infatti, il governo cerca di riconoscere e dare merito a tutti quei progetti che sono realmente in grado di dare beneficio a quelle che all'interno del documento *National strategy for sustainable construction*, pubblicato nel 2021 dal *Ministry of the interior and housing*, vengono definite come le **tre** qualità dell'edilizia sostenibile, ovvero: la qualità ambientale, la qualità sociale e quella finanziaria (*Ministry of the interior and housing* 2021, pp. 8-9).

Oltre questo aspetto, la strategia è interessata anche a promuovere una via diversa per tutto ciò che compete l'aspetto più innovativo dei progetti, ovvero **l'integrazione** nel progetto di nuovi software per il calcolo dei costi totali del ciclo di vita, in particolar modo prevedendo l'impiego di software BIM (*Building Information Modeling*), al fine di accompagnare e monitorare lo studio in merito alla sostenibilità finanziaria di un progetto.

Un secondo punto, contenuto all'interno della strategia, è quello riguardante la graduale introduzione di quello che viene definito come standard volontario di sostenibilità, fondamentale per l'affinamento di metodologie avanzate per la rendicontazione della WLC all'interno di un progetto. Infatti, lo standard così definito ha il compito di andare a **testare** a larga scala nuovi requisiti edili, al fine di rendere più matura e consapevole la conversione in chiave sostenibile del mondo edile.

Così facendo, lo standard permetterà un'introduzione graduale di nuovi principi che poi saranno introdotti ufficialmente all'interno del regolamento edilizio (entro la fine di quest'anno).

Lo standard volontario di sostenibilità, così descritto, adempie pienamente alle procedure danesi (che saranno spiegate dettagliatamente più avanti) per la valutazione dell'intero ciclo di vita (ovvero LCA). Inoltre, il requisito consisterà nell'introduzione **graduale** di un valore limite di emissioni durante l'intero ciclo di vita (secondo il concetto WLC) derivanti dalla realizzazione di un progetto; nella fattispecie il limite proposto ed introdotto nel 2023 per le nuove costruzioni superiori a 1.000 m² è quello di 12 kgCO_{2eq}/m²/anno (Fig. 8).

Il suddetto valore limite, poi, in accordo con quanto scritto nel documento ministeriale sopracitato, si **differenzierà e diminuirà** nel corso delle future date cardine (ovvero le tappe

2025, 2027, 2029) e infine si differenzierà anche a seconda della tipologia di intervento; ciò vorrà dire che nella sua stesura finale questi valori limite subiranno delle modifiche a seconda della destinazione d'uso del manufatto architettonico, ad esempio residenziale, industriale o un progetto di ristrutturazione (*Ministry of the interior and housing* 2021, pp. 10-14).

Per una chiara e intuitiva lettura delle "milestones" danesi si riporta alla figura a piè di pagina.

La ricerca di tali valori soglia all'interno del panorama danese è stata di fondamentale importanza, poiché proprio questa ha significato un **forte interesse** anche del settore privato, il quale è culminato nell'operato svolto da BUILD, che ha compiuto un'azione di analisi capace di condurre all'individuazione di suddette soglie attraverso un metodo di "bottom-up" (ovvero un metodo capace di delineare un valore di

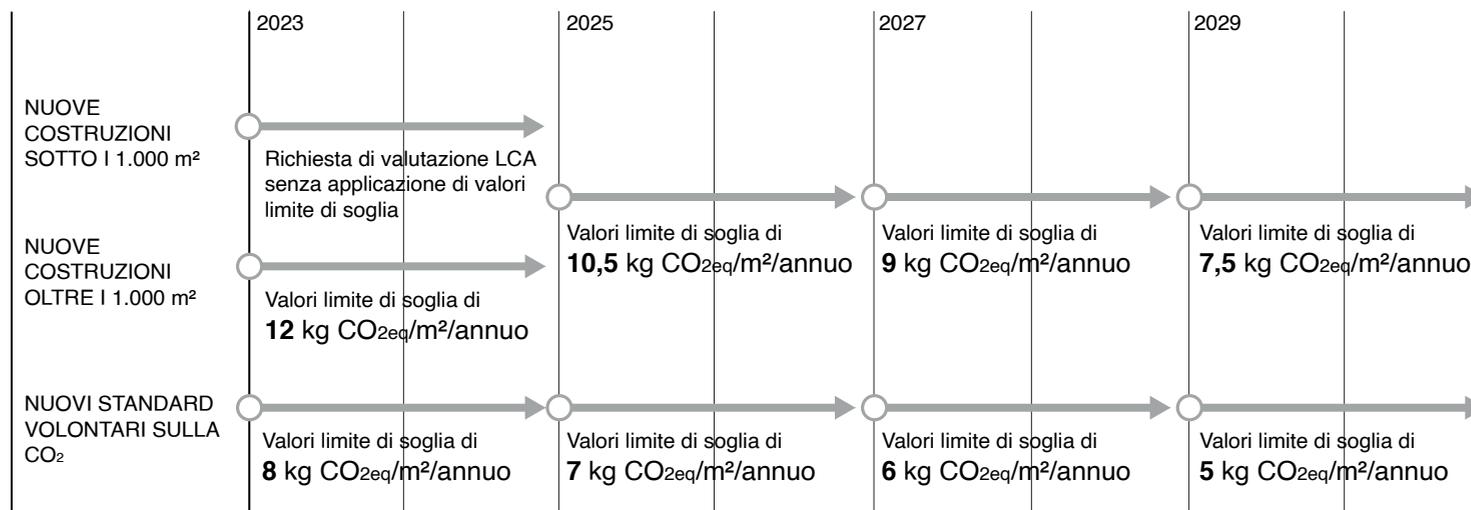


Fig.8 Inserimento graduale ed aumento dei requisiti in tema WLC secondo il governo danese (elaborazione da parte dell'autore su fonte Ministry of the interior and housing [30])

soglia studiata su base **empirica** e gradualmente ridotto nel tempo).

Infatti, come spiegato all'interno del report *Whole Life Carbon Assessment of 60 Buildings* (Aalborg University 2021), la ricerca compiuta è stata sviluppata su un ventaglio di 60 edifici costruiti dal 2013 al 2021, di cui 37 con certificazione DGNB, dove attraverso uno strumento sviluppato da loro stessi (LCAbyg lanciato nel 2015) si è affrontata una valutazione sull'intero ciclo di vita (Fig. 9). Inoltre, questi 60 edifici sono stati poi successivamente suddivisi in 5 diverse tipologie edilizie al fine di compiere uno studio il più possibile rappresentativo del tessuto danese (Aalborg University 2021, pp. 7-8).

All'interno di questa rendicontazione, poi, si è proceduto con **l'inclusione** non solo delle emissioni iniziali di carbonio, dovute alla produzione dei materiali di costruzione, bensì all'inclusione anche degli impatti provenienti

dai differenti scenari futuri di riferimento.

Per quanto riguarda invece la scelta temporale di riferimento (ovvero gli anni presi in considerazione per il calcolo), questi si suddividono in due scenari: il primo di 50 anni (essendo la *timeline* più diffusa e in accordo con i quadri europei), mentre il secondo di 80 anni, al fine di comparare poi i risultati ottenuti (in termini di GWP) e valutare gli impatti tra i due scenari.

Infatti, i risultati ottenuti dalle analisi compiute grazie all'utilizzo di LCAbyg sono stati utilizzati per formulare una **base comune** circa le prestazioni ambientali degli edifici e attraverso un'analisi statistica stabilire dei valori di riferimento mediani, così da essere in grado di stabilire dei livelli di ambizione che possano anche essere **declinati** a seconda dello studio di riferimento scelto (ovvero se 50 o 80 anni) e impiegare, almeno inizialmente, tali valori di riferimento all'interno dei sistemi volontari.

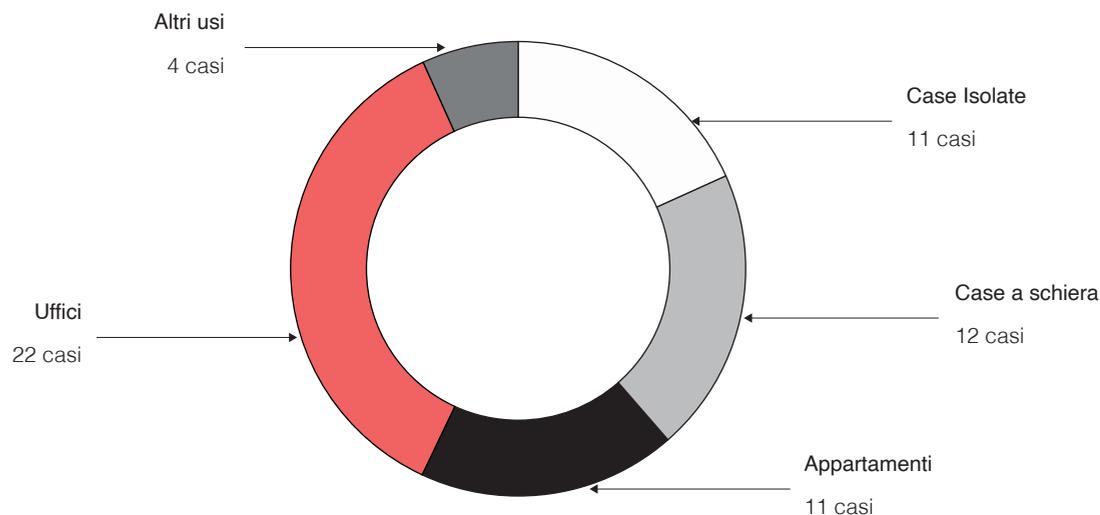


Fig.9 Grafico riassuntivo dei 60 edifici oggetto di studio (elaborazione da parte dell'autore su fonte BUILD [4])

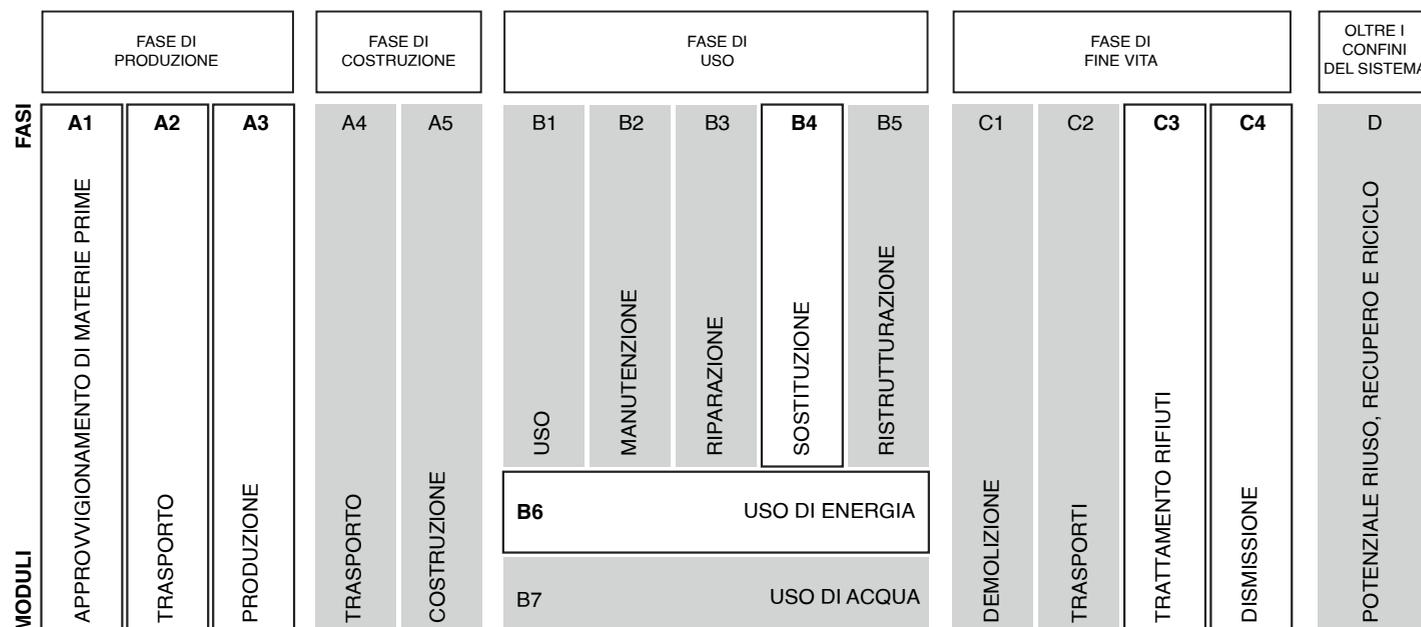


Fig.10 Fasi del ciclo di vita considerati secondo il software LCabyg (in bianco) (elaborazione da parte dell'autore su fonte BUILD [4])

Per quanto riguarda nel dettaglio il metodo LCA adottato in questa operazione, la Danimarca ha deciso di non includere interamente tutte le fasi del ciclo di vita (escludendo fasi come quella del trasporto o della ristrutturazione) con l'intento di rivolgersi esclusivamente alle fasi più importanti sotto il punto di vista ambientale, eliminando quelle fasi di cui ad oggi, per la loro rendicontazione, si è ancora parzialmente sprovvisti di dati certi in modo tale da **non influenzare** negativamente la veridicità del risultato (Fig. 10).

Per ciò che concerne invece l'unità di misura del calcolo, viene presa in considerazione la superficie lorda dell'edificio, includendo

parzialmente la superficie seminterrata a seconda della funzione (ad esempio se rampa esterna o se autorimessa) (Aalborg University 2021, pp. 22-26).

Passando invece alla provenienza dei dati inseriti, il progetto di BUILD si è servito del database di LCabyg, il quale in realtà presenta principalmente dei dati medi generici o dei dati provenienti dal database tedesco di Ökobaudat, aggiornati al 2016. Infine, i risultati finali ottenuti e presentati in GWP sono stati poi **normalizzati** rispetto al periodo di studio di riferimento (ovvero gli anni) e all'unità di misura (ovvero i m²) fornendo in questo modo, la base per la delineaazione dei valori soglia prima menzionati.

4.3. SVEZIA

All'interno del panorama svedese il processo di ricerca per l'attuazione di politiche climatiche obbligatorie per gli edifici è incominciato concretamente dal 2019, quando il governo ha incaricato il Consiglio Nazionale svedese per l'edilizia, ovvero il *Boverket*, di avviare un processo di semplificazione per l'introduzione dei nuovi regolamenti riguardanti la fase di costruzione dei nuovi edifici.

Il *modus operandi* intrapreso dal governo svedese ha quindi l'obiettivo primario di incominciare a rendicontare e, al contempo, limitare le emissioni provenienti dalla sola fase di costruzione, per poi procedere invece all'**introduzione** di nuovi valori limite di soglia che siano in grado di gestire e controllare le emissioni legate all'intero ciclo di vita di un manufatto architettonico; tale passaggio fondamentale è stato schedulato dal governo svedese per il 2027. Per quel che riguarda invece il presente, il governo ha sviluppato assieme al *Boverket* anche un database impiegabile per il calcolo delle LCA degli edifici, all'interno del quale sono stati inseriti i valori di materiali standard maggiorati del 25% al fine di incentivare l'utilizzo, da parte dei soggetti privati, di materiali certificati EPD.

Le dichiarazioni ambientali, che si ricorda si adopereranno per il solo conteggio delle fasi **A1-A5**, si applicano dal 2022 in maniera obbligatoria a tutte le richieste di permessi a costruire per edifici superiori ai 100 m², per poi ampliarsi e diventare sempre più severa a partire dal 2027, risultando così in grado di ottenere una diminuzione delle emissioni climatiche di circa il 20-30% rispetto ai valori di un edificio

odierno, passando ad una diminuzione del 40% entro il 2035 e, infine, dell'80% entro il 2043 (Rambool 2022, pp. 39-40).

A conclusione delle sezioni riguardanti Danimarca e Svezia, si tiene a precisare come negli ultimi anni entrambi i governi, assieme a quello finlandese, stiano lavorando di concerto al fine di implementare lo **scambio di conoscenze** acquisite in tema di edilizia sostenibile, attraverso una *Cooperazione Nordica*. L'intento di questa collaborazione è di essere in grado, nel breve periodo, di sviluppare un **metodo congiunto** per la valutazione dell'impatto climatico di un progetto durante il suo ciclo di vita, e che sia allo stesso modo in grado di sviluppare una banca dati comune dei prodotti da costruzione impiegabile nelle valutazioni LCA. Oltre ciò, la cooperazione nordica ha dimostrato durante questi anni una profonda lungimiranza nel redigere un manuale di supporto alle proprie imprese, il quale fosse in grado di **incentivare** l'adozione di modelli di economia circolare all'interno dei progetti. Il manuale (nella sua seconda edizione) è stato redatto dalla *Nordic cooperation* a fine 2022 con il nome di *Nordic Circular Economy Playbook 2.0* (BPIE 2023, p.33).

4.4. GRAN BRETAGNA

Al fine di una trattazione il più possibile accurata circa le iniziative europee in tema di decarbonizzazione, era poi impossibile non procedere ad un'analisi delle politiche adottate dalla Gran Bretagna, in cui si specifica che le emissioni annuali di carbonio attribuibili al settore delle costruzioni sono del 49%, ovvero superiori di circa il 10% alla media europea (LETI 2020, p.7).

La Gran Bretagna, a partire dal 2018, grazie alla collaborazione con il *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS) ha incominciato alla stesura di un nuovo documento tecnico capace di spiegare in maniera esemplare la metodologia oggi definita come di WLCA (*Whole Life Carbon Assessment*), fornendo conseguentemente anche nozioni circa i requisiti obbligatori e le indicazioni necessarie per l'effettuazione di una verifica della *Whole Life Carbon* durante l'intero ciclo di vita e prendendo poi in considerazione qualsiasi possibile **impiego futuro** dei materiali e delle componenti coinvolte.

Infatti, come spiegato dall'istituto all'interno del documento *Whole Life Carbon Assessments- 2nd Edition* (RICS 2023), l'obiettivo del RICS è quello di sviluppare una dichiarazione professionale che abbia la capacità di **standardizzare** la valutazione delle emissioni, fornendo una guida metodologica esaustiva, basata principalmente sulla normativa europea EN 15978:2011 (UNI 2011).

Inoltre, grazie alla stesura di questo documento, il RICS si pone anche l'obiettivo di foraggiare e incentivare a nuove azioni, come ad esempio ad azioni di *benchmarking*; le quali risultano essere fondamentali per poter

ottenere dei valori conclusivi di WLC che, essendo calcolati tramite una stessa **base comune**, permettono una possibile comparazione tra diversi edifici e risultati dando, successivamente, la possibilità di fissare a livello normativo dei nuovi e più stringenti valori di soglia per le emissioni di anidride carbonica durante l'intero ciclo di vita.

Un' ulteriore azione individuata dal RICS, è successivamente quella di **innescare** all'interno del settore edile una prospettiva a lungo termine, più coerente ed allineata nelle aspirazioni alle direttive e ai pensieri europei in tema di decarbonizzazione delle nostre città (RICS 2023, pp. 15-16).

Per tale motivo, questo report ad oggi rappresenta il documento cardine su cui si sono basati più o meno tutte le metodologie WLCA degli altri Stati (anche di quelli precedentemente analizzati), poiché al suo interno non sono solo presentati i punti di forza e i benefici, bensì anche le **limitazioni** (come la limitatezza che ad oggi alcuni dati possiedono) e le raccomandazioni da tenere presente durante il calcolo, come ad esempio la necessità di accompagnare le fasi successive di un progetto con ulteriori WLCA o la necessità di un costante controllo e verifica delle fasi di costruzione, al fine di ottenere un *WLCA as-built* coerente.

All'interno del suddetto documento poi, il RICS fornisce tutti i passi e i necessari dati di *input* per una rendicontazione precisa di una WLCA; partendo dalla **delimitazione** spaziale e temporale dell'intervento, per passare ai dati riguardanti la costruzione, terminando con i possibili scenari della fase D, i quali contributi, secondo lo standard del RICS, dovranno essere

rendicontati separatamente rispetto a quelli riscontrati all'interno delle fasi A, B e C (RICS 2023, pp. 27-31).

Si specifica, che in questi anni il RICS ha avviato una collaborazione con diverse organizzazioni, con l'intento di produrre un database che sia in grado di raccogliere dati in merito alle emissioni di carbonio dell'ambiente costruito. Questa piattaforma, che prende il nome di *Built Environment Carbon Database* (BECD), permetterà di ottenere una banca dati in grado di effettuare un *benchmarking* proficuo, così da sviluppare ed efficientare i risultati ottenuti da una valutazione di carbonio emesso durante il ciclo di vita.

Allo stesso tempo, sempre all'interno del panorama inglese, possiamo riscontrare un secondo fondamentale esempio di supporto per la **transizione sostenibile** del settore delle costruzioni, che è rappresentato dal *Low Energy Transformation Initiative* (LETI), ovvero da una rete volontaria di oltre 1000 professionisti che, a partire dal 2017, hanno collaborato affinché si istituisse un gruppo di lavoro per la stesura di nuove raccomandazioni per l'edilizia, che fossero in grado poi di essere recepite a livello politico e successivamente integrate nei nuovi piani strategici per la città di Londra. Infatti, come si può leggere all'interno del documento *LETI Embodied Carbon Primer-Supplementary guidance to the climate emergency* (LETI 2020), le analisi condotte dal LETI, partono tutte da una disamina delle politiche correnti in tema di decarbonizzazione, **evidenziandone** il forte ritardo e, di conseguenza, fornendo delle soluzioni al fine di ottenere (entro il 2025) l'ambizioso obiettivo di un **nuovo** parco nazionale di edifici interamente a zero emissioni.

Tale considerazione da parte dell'ente è evidenziata all'interno del paragrafo 5.0 *Contribution to Zero Carbon* (LETI 2020, p. 18), in cui il LETI esplicita la necessità di un cambio di prospettiva per la lotta al cambiamento climatico nel settore delle costruzioni, poiché questo è stato da sempre fortemente inteso come riduzione di quello che viene definito *Operational Carbon*, **tralasciando** di conseguenza la quota parte di *Embodied Carbon* propria dei materiali da costruzione.

Tale approccio, negli anni, ha reso però l'importanza (in termini di emissioni) dell'EC sempre più significativa, fino ad arrivare potenzialmente a ricoprire una quota di emissioni di circa il 40-70% rispetto al totale di CO_{2eq} contabilizzato durante il ciclo di vita di un manufatto architettonico (si tiene a specificare che tale risultato si conseguirebbe in assenza di azioni volte al contenimento e alla decurtazione del "carbonio incorporato"). L'obiettivo del LETI, perciò (come si può chiaramente evincere dalla Fig.12), è quello di fornire una **visione** che sia concretamente in grado di decurtare entro il 2030 non solo l'OC di un edificio ma, soprattutto, l'EC legato alle componenti ed ai materiali impiegati all'interno del progetto (LETI 2020, pp. 18-19).

Tra le soluzioni proposte per l'adempimento degli obiettivi, il LETI, all'interno del già citato documento propone diverse **azioni percorribili**; ad esempio, come già ampiamente ribadito prima con il RICS, la necessità di delineare una nuova metodologia per la contabilizzazione del carbonio a vita intera o la necessità, da parte dei professionisti, di giungere alla delineazione di diversi archetipi edilizi che possano essere d'esempio soprattutto in tema di sostenibilità.

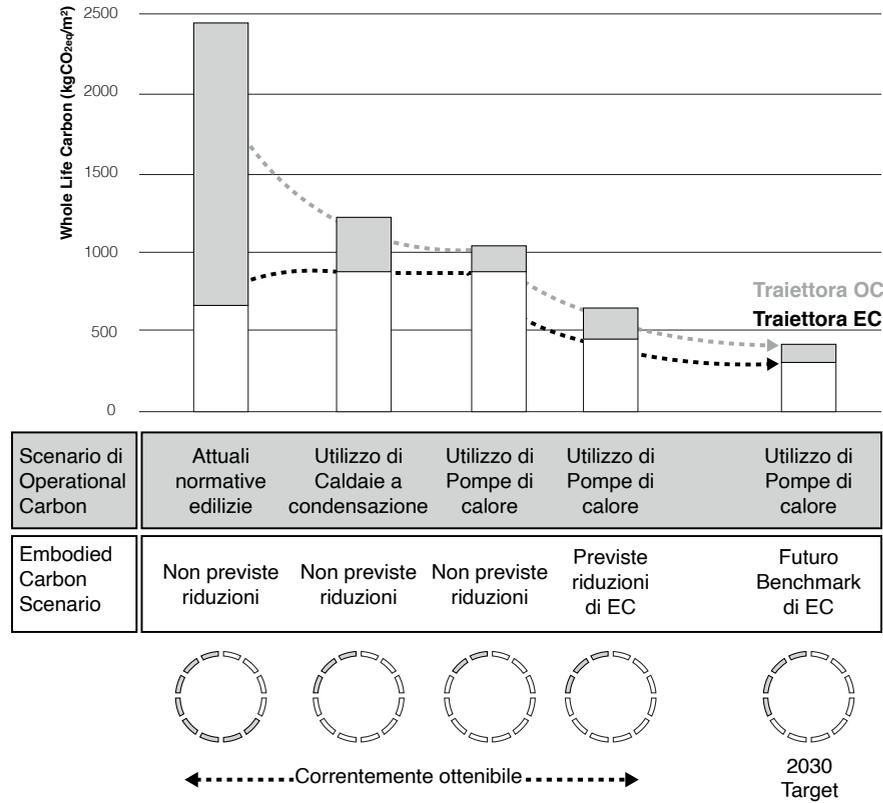


Fig.11 Esplicitazione delle traiettorie di Embodied e Operational Carbon (elaborazione da parte dell'autore su fonte LETI [27])

Un'ulteriore azione praticabile per il raggiungimento del noto *Net Zero Carbon*, secondo il LETI, sarebbe quella di attuare un profondo cambiamento riguardante le politiche per il riutilizzo dei materiali di scarto o dei materiali provenienti generalmente da processi di demolizione, così da munire il settore di **nuove guide** alla progettazione che possano permettere la decurtazione dell'emissioni afferenti all'*Embodied Carbon* dei materiali. Oltre questo, si può notare come all'interno del report sia dedicato ampio spazio anche al

tema dell'*offsetting*, ovvero della possibile **compensazione** delle emissioni prodotte per la realizzazione di un manufatto.

Tale azione, può avvenire in modalità differenti: o attraverso sistemi specifici che siano in grado di stoccare e catturare CO_{2eq} (come, ad esempio, sistemi di copertura verde) o attraverso l'installazione di nuove fonti di energia rinnovabile, al fine di efficientare la produzione di energia sostenibile (LETI 2020, pp. 108-110).

Come precedentemente esposto, lo sviluppo di queste iniziative (come quella del LETI o del RICS) hanno permesso anche un'**implementazione costante** degli strumenti politici impiegati, come testimoniato dal documento pubblicato dalla municipalità di Londra nel marzo del 2022 dal nome *London Plan Guidance-Whole Life Cycle Carbon Assessments* (Mayor of London 2022).

Il documento appena citato, infatti, si presenta sostanzialmente come una guida per preparare una valutazione del carbonio nel ciclo di vita che si allinei alle politiche di Londra, esposte all'interno del Piano 2021. All'interno di questo documento, vengono infatti esposti processi e metodologie da seguire pedissequamente per il raggiungimento di un conteggio e di una conseguente **riduzione** delle emissioni di anidride carbonica. Inoltre, all'interno del *London Plan* si può riscontrare la presenza in particolare della tabella A2.1, nella quale sono riassunti gli obiettivi e i punti

di riferimento da raggiungere in termini di $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ da ciascuna fase del ciclo di vita.

Tali obiettivi sono suddivisi secondo un **approccio** "base" e uno "ambizioso" per poi suddividerla ulteriormente a seconda delle diverse destinazioni d'uso (uffici, residenziale, scuole ed università) (Mayor of London 2022, pp. 4-13).

Nella tabella sottostante, si riporta uno stralcio dei benchmark inglesi suddivisi per fasi del ciclo di vita. Tale risultato, come esposto all'interno del documento, è stato possibile solo grazie ai consigli e all'esperienze accumulate da enti come quelli prima citati ed è per questo motivo che tali esperienze e ricerche, le quali spesso nascono prettamente per la sfera privata e professionistica, sono da considerarsi come la **principale fonte** per un costante aggiornamento e implemento anche della sfera pubblica e politica.

Residenziale			
Moduli	Punti di riferimenti WLC Base ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$)	Punti di riferimenti WLC Ambizioso ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$)	Scomposizione di uno sviluppo tipico
A1-A5 (esclusa la "Carbon Sequestration")	<850	<500	Sottostruttura 21% Sovrastruttura 33% Facciata 18% Finiture interne 10% FFE 1% Servizi 16% Opere esterne 1%

Tab.12 Benchmark inglesi di WLC (stralcio) (elaborazione da parte dell'autore su fonte Mayor of London [28])

4.5. ITALIA

Per quanto riguarda invece la situazione italiana occorre innanzitutto partire dai dati che possano effettivamente fotografare la situazione del settore edile italiano. Infatti, sempre facendo riferimento al già citato documento *Italy Climate Report 2022* (I4C 2022), ad oggi in Italia il settore delle costruzioni risulta essere il settore più energivoro, poiché annualmente richiede per il suo sostentamento ben 49 milioni di tep (ovvero di tonnellate equivalenti di petrolio) che corrispondono al 44% del totale nazionale impiegato. Allo stesso tempo, però, il fabbisogno energetico degli edifici in Italia è quello che oggi, più di tutti, viene soddisfatto tramite l'impiego di fonti rinnovabili, utilizzando una quota verde che si attesta al 25% dei consumi totali.

Tuttavia, nonostante un decremento delle emissioni di CO_{2eq}, gli edifici in Italia continuano a rappresentare il **secondo settore** più inquinante, con un totale di 110 milioni di tonnellate emesse solo nel 2019 (I4C 2022, pp. 55-62).

Inoltre, dopo aver effettuato nel precedente paragrafo una diagnosi delle normative attuate per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni (la quale risulta essere sicuramente fondamentale per fornire dei **chiari riferimenti** ai ruoli attivi del settore), all'interno di questo spazio si procederà con le iniziative nostrane in tema di decarbonizzazione e di WLC.

Infatti, ad oggi nel territorio italiano sono molteplici le iniziative o le attività di ricerca, svolte spesso da enti privati, che avvengono con l'intento di **favorire e accelerare** una

diffusione di nozioni e di buone pratiche, finalizzate a consentire un cambiamento ed una trasformazione nel mondo delle costruzioni italiano.

Uno degli esempi più compiuti in tal senso è il documento presentato all'interno del progetto *#Building Life* dal *Green Building Council Italia*, a fine 2022 e dal titolo *Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito-Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050* (GBC Italia 2022a).

In dettaglio, all'interno di questo report, la GBC Italia si prefigge l'obiettivo non solo di informare e sensibilizzare la *audience* italiana nel mondo delle costruzioni, bensì intende fornire **soluzioni attuabili** in termini tecnici, finanziari e metodologici per il raggiungimento del *target* di neutralità climatica entro il 2050, aggiornandone le tematiche e le visioni (soprattutto in tema di WLC).

Nello specifico, la *roadmap* fornita da GBC Italia consta di 53 obiettivi, i quali riguardano 3 diverse classi di azione: la decarbonizzazione degli edifici, la circolarità per il settore delle costruzioni e, infine, la qualità e la resilienza delle città (GBC Italia 2022a, pp. 8-9). Per ciò che riguarda il primo obiettivo, di maggiore interesse all'interno di questa sede, la *roadmap* fornisce una tabella di marcia composta da 22 obiettivi, divisi da 3 *milestones* ovvero da tre momenti diversi e cruciali, quindi precedenti alla data cardine del 2050, quali: il 2025, 2030 ed il 2040. I 22 obiettivi proposti dalla GBC Italia sono da intendersi in **maniera integrata**, poiché interessati non soltanto dal perseguimento di un fine specifico, bensì da un cambiamento che abbracci tutta la filiera interessata apportando modifiche, ad esempio:

nel campo della ricerca di nuovi strumenti o metodi per il conteggio; nel monitoraggio delle emissioni causate dall'ambiente costruito; nell'aggiornamento attraverso corsi formativi dei professionisti coinvolti o nella definizione di nuovi *target* di consumi energetici e di emissioni, applicando tali limiti a edifici residenziali e non (GBC Italia 2022a, pp. 12-13).

Nonostante si ribadisca nuovamente l'importanza di ognuno di questi 22 obiettivi, al fine di ottenere un parco edilizio in ZEB e quindi a zero emissioni di carbonio entro il 2050, in questa sede si prenderà in esame soprattutto il quarto obiettivo, ovvero quello riguardante la definizione di metodologie per il calcolo WLC che, all'interno della *roadmap* fornita, ha come scadenza ultima il 2025.

Infatti, entro tale data, ai ministeri competenti sarà richiesto di **validare a scala nazionale** una metodologia che, rispondente alle direttive europee, sia in grado di integrare gli esistenti protocolli di valutazione in merito alla sostenibilità degli edifici e che al contempo, come scritto all'interno del citato documento, sia capace di definire un approccio progettuale basato sul ciclo di vita del manufatto (GBC Italia 2022a, p. 85). La realizzazione di tale obiettivo, sempre riprendendo quanto scritto da GBC Italia, richiede inevitabilmente degli sforzi politici differenti; se ai ministeri è richiesto il compito di istituire dei tavoli tecnici al fine di inserire la tematica del WLC all'interno degli strumenti di politica nazionale (ad esempio il PNIEC) e di rendere il calcolo della sostenibilità **obbligatorio** (al pari di un calcolo strutturale), alle amministrazioni locali è invece richiesto il controllo circa l'inserimento di tale indicatore all'interno dei titoli abilitativi (ad esempio CILA

o SCIA) o all'interno dei permessi a costruire.

Infatti, il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione sarà possibile se, e soltanto se, si adotterà un approccio sistematico, corale e quindi olistico che, favorendo il coinvolgimento di tutti i soggetti (pubblici e privati) nell'adozione di una nuova metodologia, renderà possibile la definizione su scala nazionale non solo di parametri tecnici per la verifica della sostenibilità ambientale, bensì anche la realizzazione di un mercato finanziario **fiducioso** a tal punto da rendere conveniente investire per l'ottenimento degli obiettivi di neutralità climatica (GBC Italia 2022a, p. 57; p. 105).

Infine, si ritiene opportuno citare in questo lavoro di Tesi, il progetto *Indicate*. Tale iniziativa, lanciata nel dicembre del 2022 dal W/GBC esclusivamente per l'Europa, richiede ai Paesi partecipanti, tra cui l'Italia, la raccolta di dati affidabili e completi in merito alle emissioni di anidride carbonica lungo l'intero ciclo di vita degli edifici, al fine di colmare la **lacuna** conoscitiva in merito alla WLC dei Paesi membri, la cui carenza di dati finisce per compromettere inevitabilmente anche la sfera decisionale e politica per la riduzione degli impatti ambientali legati alle varie fasi del ciclo di vita degli edifici.

Tale iniziativa, incentivando una **collaborazione** a livello europeo tra diversi Paesi, permetterà nel breve periodo di accelerare il processo di definizione, e conseguentemente di **adozione**, di concreti valori di soglia (ovvero di *threshold*) di WLC, al fine di procedere in maniera definitiva alla completa decarbonizzazione del settore delle costruzioni anche italiano.

4.6. ANALISI COMPARATIVA

A conclusione di questo piccolo rapporto effettuato sull'operato in tema di WLC da parte di cinque diverse nazioni, si può affermare come negli ultimi anni sia **evidente un interessamento** riguardo le pratiche di calcolo della WLC da parte degli attori pubblici e privati, che spesso hanno portato non solo ad azioni di ricerca in merito al tema, bensì anche alla formulazione di veri e propri strumenti di supporto sia per la rendicontazione che per la deduzione di valori limiti di soglia, come visto del resto nel caso della Gran Bretagna, della Francia o della Danimarca.

Oltre ciò, si è visto come in tutti i Paesi presi in considerazione (eccetto l'Italia), abbiano già integrato o siano prossimi ad una integrazione degli strumenti per la rendicontazione all'interno di un chiaro quadro politico, includendo questi all'interno delle strategie nazionali per la decarbonizzazione.

Tale passo, di cruciale importanza per l'adempimento con gli accordi presi, è inoltre solo il risultato di una continua azione di studio e *benchmark* che ha permesso non solo la comprensione da parte degli attori coinvolti del tema trattato, ma anche la **divulgazione** dei concetti e degli obiettivi posti, preparando così il settore delle costruzioni delle nazioni coinvolte ai cambiamenti che saranno necessariamente richiesti nel breve periodo.

All'interno di questa azione di *comparison*, poi, non ci si può esimere anche dal valutare l'operato del nostro paese, il quale risulta **pericolosamente indietro** in merito a queste tematiche, poiché risulta assente un interessamento corale in merito alla tematica

(ad oggi, l'unico operato attivo in Italia in merito alla WLC è stato quello svolto dal GBC Italia) e, soprattutto, carente di azioni di studio e analisi dell'esistente, causando una conseguente carenza anche di dati inerenti alla *Whole Life Carbon* del tessuto edilizio odierno.

Infatti, così facendo, attualmente risulta difficile la programmazione di obiettivi in merito alla riduzione dell'emissioni durante l'intero ciclo di vita del settore delle costruzioni, il quale come visto precedentemente, è fondamentale che riduca il suo impatto al fine di ottenere una decarbonizzazione delle nostre città.

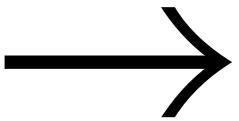
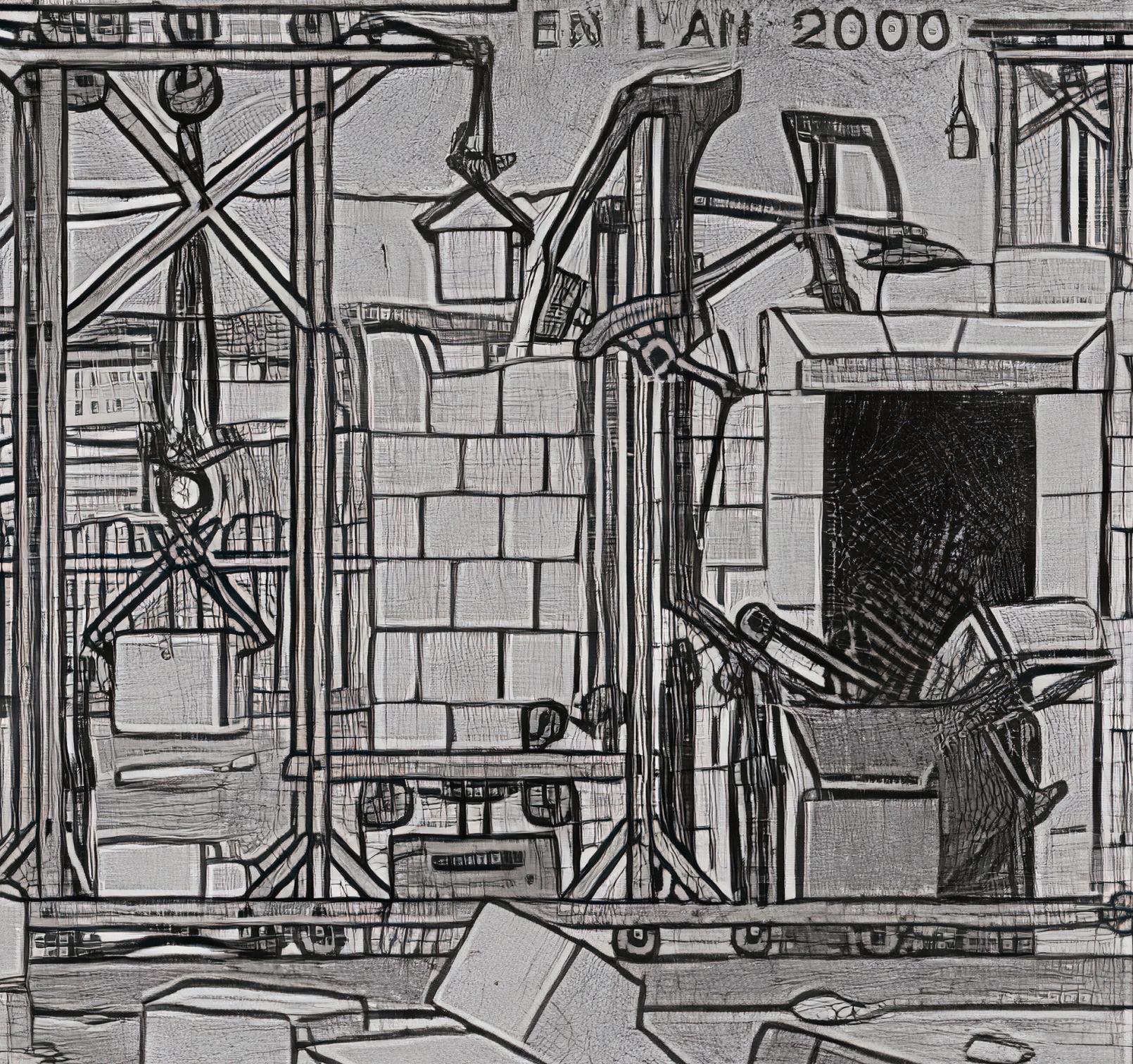
Ciò che pertanto ci si augura di osservare presto nel panorama nazionale è, in *primis*, di **non porre** ulteriormente le date limite per l'integrazione del WLCA all'interno delle prassi edilizie e degli strumenti politici (ad oggi prevista entro il 2025) e di ottenere valori di soglia in termini di CO_{2eq} sì ambiziosi, ma al contempo capaci di prendere in considerazione quelli che sono i valori di emissione correnti per la realizzazione e l'uso, nel nostro paese, di un manufatto architettonico.

Riassumendo, quindi, per l'Italia ci si augura un'azione di studio ed analisi dell'esistente simile a quelle avvenute in nazioni come la Francia o la Danimarca, in cui gli attori coinvolti sono stati preparati al cambiamento di passo e in cui i valori di soglia sono stati frutto di uno **studio capillare** sul tessuto esistente, prevedendo così l'introduzione di valori che solo con il tempo e con l'affinamento delle capacità possano divenire sempre più severi e stringenti. Nella pagina seguente (Fig. 13) si propone uno schema sinottico riassuntivo delle politiche analizzate in questo capitolo.

Metodo e dati	DANIMARCA 	FRANCIA 	SVEZIA 	UK 	ITALIA 
Area di applicazione	Per tutti i nuovi edifici. Valori limite solo per edifici di dimensioni superiori a 1.000 m ² .	Per i nuovi edifici residenziali, uffici e scuole.	Tutti i nuovi edifici, ad eccezione di edifici pubblici specifici ed edifici di costruttori privati.	Per tutti i nuovi edifici.	Per tutti i nuovi edifici ed esistenti (con interventi superiori ai 500 m ²).
Componenti contemplate	Sottostruttura, sovrastruttura, arredi interni e servizi dell'edificio.	Sottostruttura, sovrastruttura, arredi interni e servizi dell'edificio. Tutti i componenti descritti nella richiesta di autorizzazione alla costruzione.	Sottostruttura, sovrastruttura	Opere di demolizione (se previste), Sottostruttura, sovrastruttura, arredi interni e servizi dell'edificio.	Opere di demolizione (se previste), Sottostruttura, sovrastruttura, arredi (facoltativo).
Moduli del ciclo di vita	A1-3, B4, B6, C3-4, D (separato)	A1-5, B1-B6, C1-C4, D	A1-5	A1-5, B1-B6, C1-C4, D (separato)	A1-5, C1-C4 (valutazione raccomandata)
Database e strumenti di calcolo contemplati	Dati governativi da database (basati su ØKOBAUDAT). Strumento di calcolo fornito dal BUILD institute "LCAbyg".	Database INIES. Strumenti di calcolo verificati, tra cui ELODIE sviluppato dal CSTB.	Database sviluppato dal Boverkets. Strumenti di calcolo verificati dall'Agenzia svedese per la protezione dell'ambiente.	Built Environment Carbon Database (BECD). Strumenti nazionali basati sullo standard di riferimento per il calcolo fornito dalla RICS.	Database in fase di elaborazione da parte di ENEA. Strumenti nazionali di calcolo in fase di elaborazione.
Caratteristiche dell'LCA	LCA dettagliato.	LCA dinamico.	LCA semplificato.	LCA dettagliato.	LCA dettagliato.

Fig.13 Quadro sinottico delle politiche europee in tema di WLCA (elaborazione da parte dell'autore su fonte BPIE [8])





SECONDA PARTE

SECONDA PARTE

5. ASPETTI METODOLOGICI PER UNA VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON

6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON E DELL'OPERATIONAL CARBON DI UN MANUFATTO EDILIZIO

7. BOX 1 - APPROFONDIMENTO SUL LEGNO

8. BOX 2 - APPROFONDIMENTO DELLA METODOLOGIA TM54

5. ASPETTI METODOLOGICI PER UNA VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON

Nel capitolo 5 si introdurrà la metodologia nota come Whole Life Carbon Assessment ovvero la valutazione di tutte le emissioni di CO₂eq di un manufatto architettonico rilasciate durante l'intero ciclo di vita. In primo luogo si fornirà una definizione e una illustrazione dei principi e degli indicatori che regolano la metodologia di contabilizzazione, per poi successivamente descrivere alcuni aspetti riguardanti il metodo di analisi e le modalità di calcolo.

Ai fini di questa disamina, sono stati presi in considerazione numerosi documenti, due dei quali sono risultati di fondamentale importanza per la predisposizione del presente capitolo: Whole Life Carbon Assessment- 2nd Edition di RICS (RICS 2023), mentre il secondo è il documento redatto dal Politecnico di Torino in collaborazione con il GBC Italia, dal nome Strumenti per la decarbonizzazione: Contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio (GBCItalia 2022d).

Questi due documenti, pubblicati entrambi nel corso del 2023, rappresentano la più aggiornata sintesi sui ragionamenti relativi alla valutazione WLC.

5.1. FASI DEL CICLO DI VITA DI UN MANUFATTO ARCHITETTONICO

La valutazione di un elemento complesso come un manufatto edilizio è subordinata a una

metodologia di calcolo capace di fornire gli strumenti utili a valutare le singole fasi del ciclo vita dell'oggetto preso in esame.

Nel caso di un edificio, la norma UNI EN 15978

:2011 (UNI 2011) suddivide il ciclo di vita dell'edificio secondo 5 principali fasi (si veda la Fig.14 a p. 60).

Compito principale della WLCA sarà quello di riferire, per ogni singola fase decisa di contemplare, un quantitativo equivalente di $kgCO_{2eq}$, utile a stabilire le emissioni **comportate** dalla realizzazione e dall'utilizzo

dell'edificio stesso, calcolando in questo modo l'impatto ambientale corrispondente (Fig. 14).

Nel dettaglio, la norma UNI EN 15978:2011 (UNI2011) garantisce la possibilità di riscontrare cinque diversi momenti, trattati di seguito. Il primo, che va dalla fase A1-A3 prende il nome di "produzione", in cui sono racchiuse tutte quelle operazioni che si ritengono necessarie alla

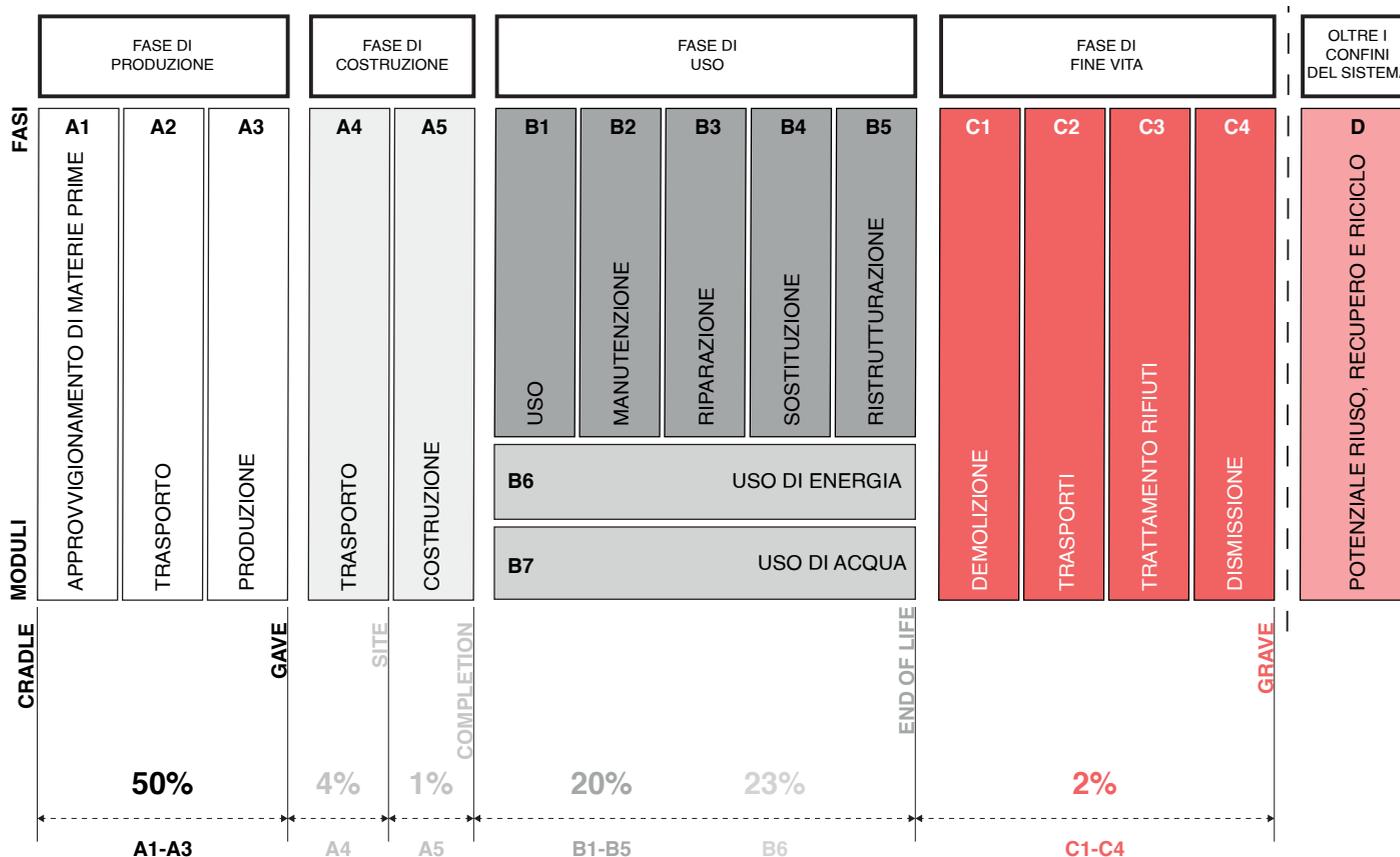


Fig.14 Suddivisione in percentuale delle emissioni di CO_2 secondo le fasi del ciclo di vita EN 15978:21 (elaborazione da parte dell'autore su fonte ISTRUCTE [35])

realizzazione (ad esempio, di un componente edilizio); il secondo momento, fasi A4-A5, è quello riguardante il “trasporto” del prodotto al sito di costruzione.

A seguire, troviamo la fase di “uso”, che va dalla fase B1 alla fase B7 e che riguarda tutte quelle azioni legate al normale utilizzo di un edificio, contemplando anche le annesse sostituzioni o manutenzioni; il quarto momento si ritrova nelle fasi C1-C4 ed è inerente alle demolizioni o allo smantellamento e al conseguente trasporto dei rifiuti ai siti di smaltimento e infine abbiamo il modulo D, ovvero il modulo che generalmente possiamo definire predisposto all'approfondimento degli approcci legati al concetto di *circular economy*.

Infatti, all'interno di questa fase si ha lo scopo di definire i **benefici** associati ad un riutilizzo o un riciclo di determinati materiali o, ancora, allo scenario di smaltimento pensato per i componenti e i materiali impiegati all'interno del progetto.

Attraverso la delineazione di queste diverse fasi, il compito della metodologia sarà quello di assegnare i corrispondenti valori di $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$, al fine di attuare una rendicontazione il più possibile completa. Inoltre, è doveroso ricordare che ai fini di una valutazione di WLCA, si possono andare a distinguere tre diverse “tipologie” di fasi del ciclo di vita, come descritto all'interno della EN 15978:2011 (UNI 2011).

Difatti, tra tutte le fasi che compongono l'intero ciclo di vita, possiamo riscontrare la presenza di alcuni processi “raccomandati” ai fini di una valutazione WLCA (come, ad esempio, la fase di sostituzione B4), mentre altri sono da considerarsi “facoltativi” (come la fase

di manutenzione B2) per via della difficoltà nel reperimento di dati certi in merito ai processi coinvolti all'interno di quella fase.

Oltre queste abbiamo un'ultima tipologia, definita di ambito minimo di applicazione, la quale risulta essere imprescindibile per poter effettuare una verifica minima delle emissioni rilasciate durante il processo di costruzione.

In dettaglio, l'ambito minimo si applica solamente per le fasi A1, A2, A3 poichè queste risultano essere in grado di consentire uno studio appena **sufficiente** per la determinazione, seppur parziale, di *Whole Life Carbon* (RICS 2023, pp. 43-44).

5.2. INDICATORI CHIAVE: EMBODIED CARBON ED OPERATIONAL CARBON

Per Embodied Carbon (EC) si intende l'anidride carbonica equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) emessa o sequestrata da un determinato componente edilizio o dal manufatto stesso nel corso del ciclo di vita, escludendo le fasi di *operational* a cui fa riferimento un secondo indicatore definito, appunto, *Operational Carbon* (OC). La metodologia presa a riferimento per la contabilizzazione e la quantificazione dell'indicatore EC utilizza come unità di misura il $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ rapportato ad uno scenario temporale di riferimento (STR) di al più 100 anni. Il calcolo delle emissioni di EC prende, inoltre, in considerazione **tre** differenti tipologie di emissioni definite di: Scopo 1, 2 e 3. Nel dettaglio, le emissioni di EC di Scopo **1** sono tutte le emissioni dirette, quindi associate ad un processo di produzione di un materiale o di una componente (ad esempio, le emissioni connesse alla combustione di combustibile fossile da parte di un impianto di riscaldamento).

Le emissioni di Scopo **2** sono invece definite emissioni indirette, ovvero quelle incluse all'interno dei processi di trasporto o di produzione delle risorse energetiche, che saranno poi impiegate nei processi di produzione (ad esempio, le emissioni connesse all'acquisizione di energia consumata poi da un terzo soggetto, come un'azienda). Infine, si hanno le emissioni di Scopo **3**, che corrispondono ad una seconda tipologia di emissioni indirette di un ciclo di vita di un generico prodotto o servizio. Queste ultime emissioni, che sono assolutamente le più complesse da rendicontare poiché afferenti a sfere difficilmente controllabili, sono ad esempio corrispondenti ai processi di trasporto compiuti dai dipendenti di un centro di produzione (RICS 2023, p. 15).

La somma **aggregata** di queste tre differenti tipologie concorre alla definizione di un valore unitario di EC.

Inoltre, si ritiene opportuno in questa sezione approfondire la dicotomia che il *United Nations Environment Programme* (UNEP) o la *Global Alliance for Building and Construction* (GlobalABC) sottolineano per i concetti, precedentemente esposti, di *Operational*

Carbon ed *Embodied Carbon*. Infatti, ad oggi, l'EC non è più considerabile come un indicatore trascurabile e, quindi, una sua compiuta ed efficiente rendicontazione risulta essere **necessaria**, al fine di ridurre di almeno il 40% il suo ammontare entro il 2030 (come sottoscritto sia da UNEP che da GlobalABC). Per quanto riguarda invece le emissioni legate alla fase operativa (quindi all'OC) queste dovranno essere ridotte del 100% entro il 2030, prevedendo quindi un parco edilizio di nuova realizzazione che sia in grado di svolgere le proprie funzioni senza emissioni di anidride carbonica equivalente.

Infine, un secondo punto fondamentale per la distinzione dei due indicatori è il seguente: se l'OC può essere soggetta a riduzione grazie ad un largo impiego di risorse rinnovabili, l'EC è **difficilmente** passibile di riduzioni consistenti, poiché una sua diminuzione sarebbe sinonimo di un totale cambiamento delle tecniche di estrazione, produzione, costruzione e trasporto le quali, ad oggi e nel breve-medio periodo sono difficili, se non impossibili, da pronosticare (GlobalABC; UNEP 2023, pp. 7-9).

In questo contesto, quindi, si inserisce



Fig.15 Emissioni di CO₂ associate alle fasi del ciclo di vita di un edificio (elaborazione da parte dell'autore su fonte BPIE [6])

l'**importanza** della valutazione eseguita attraverso un metodo di WLCA, poiché permette non solo la rendicontazione dell'emissioni legata ad una fase di *Operational*, ma anche la contabilizzazione dell'indicatore di *Embodied*, fino ad oggi parzialmente sottovalutato dalle metodologie "ufficiali" di valutazione degli impatti ambientali.

5.3. METODO BASE E METODO AVANZATO

Per quanto concerne la metodologia di *accounting* dell'*Embodied Carbon* è possibile dividerla, in accordo con una visione olistica e processuale del progetto, secondo due **diversi livelli di dettaglio**, che prendono il nome di metodo "*base*" e metodo "*avanzato*".

Questi due metodi, come si può facilmente intuire, si differenziano per la **profondità** con la quale affrontano la determinazione dell'EC e per questo sono strumenti che vengono proposti in due unità temporali differenti. Infatti, il primo metodo ovvero quello "*base*", viene impiegato in quella fase di progettazione che nel nostro paese prende il nome di progettazione preliminare (*early design phase*), dove in maniera tutto sommato **approssimata** si valutano le emissioni di carbonio del manufatto al fine di consentire, attraverso l'utilizzo di database (*generic data*), le eventuali e necessarie correzioni.

Il secondo metodo invece, definito come "*avanzato*", ha il dovere di quantificare in maniera più **dettagliata** l'impronta di carbonio e, oltre ad essere associato ad una fase esecutiva di progetto (*later phase*), per procedere alla contabilizzazione impiega non solo delle banche dati (*specific data*), bensì anche delle certificazioni ambientali (EPD), che attraverso

l'**integrazione** di figure professionali, permettono il conteggio finale in una forma più che soddisfacente (GBC Italia 2022d, p.24).

5.4. SCELTA DEGLI ELEMENTI TECNICI DA CONTEMPLARE NELLA VALUTAZIONE

A questo punto si giunge ad un momento cruciale e sicuramente delicato di questa fase metodologica, che è quello riguardante la effettiva **comprensione** delle voci da contemplare per il calcolo (sia per il metodo base che per quello avanzato). Infatti, come descritto dalla norma UNI 8290-1:1981 (UNI 1981), per manufatto edilizio si intende un risultato progettuale composto dall'aggregazione di singoli elementi tecnologici e funzionali, i quali elementi, sempre all'interno della norma, vengono successivamente suddivisi secondo una classe di *Unità tecnologica*. Un' esempio di contemplazione di elementi tecnologici possibile, è quella proposta dagli autori del sopracitato documento del GBC Italia (Roberto Giordano e Jacopo Andreotti), i quali hanno esposto uno schema circa gli elementi da considerare nella valutazione, suddividendoli in elementi "*raccomandati*" e "*facoltativi*".

La tabella che segue (Tab. 16 e 16a), difatti, sarà poi il **prototipo** di quella che il progettista sarà chiamato a redigere *ad hoc* per il progetto, arricchendo le voci decise di includere nella contabilizzazione secondo valori di: densità, di spessore, di peso e di percentuale di incidenza del materiale impiegato (quindi, una volta individuata l'unità tecnologica *chiusura verticale* e, di conseguenza, *infissi esterni verticali*, si provvederà a fornire tutti i dati riguardanti alle "componenti" che concorrono alla formazione di un infisso) (GBC Italia 2022d, pp. 25-26).

Lavorazione	Classe di Unità Tecnologica	Unità Tecnologica	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 • Trattamento rifiuti 	•
1	/	Struttura portante	1.1 Struttura di fondazione	<ul style="list-style-type: none"> • Fondazione dirette • Fondazione indirette 	•
			1.2 Struttura di elevazione	<ul style="list-style-type: none"> • Elevazioni verticali • Elezioni orizzontali e inclinate • Elezioni 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"> • Parete 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 	•
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 esterni orizzontali 	•
			3.3 Partizione interna inclinata	<ul style="list-style-type: none"> • Scale interne • Rampe interne 	•

Tab.16a Quadro sinottico degli elementi materici inclusi nella valutazione EC di un manufatto edilizio (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

4	/	Partizione esterna	4.1 Partizione esterna verticale	• Elementi di protezione • Elementi di separazione	•
			4.2 Partizione esterna orizzontale	• Balconi e logge • Passerelle	•
			4.3 Partizione esterna inclinata	• Scale esterne • Rampe esterne	•
5	/	Impianto di fornitura servizi	/	/	•
6	/	/	/	• Manufatti edilizi prefabbricati	•
7	Operazioni su edifici esisistenti	/	/	• Demolizioni selettive • Integrazioni e modifiche	•
8	Operazioni esterne	Attrezzatura esterna	/	• Lavori di preparazione del sito	•
				• Strade, sentieri, pavimentazioni e rivestimenti	•
				• Recinzioni righiere e muri	•
				• Impianti e servizi esterni	•
				• Opere edili minori ed edifici accessori	•

Tab.16b Quadro sinottico degli elementi materici inclusi nella valutazione EC di un manufatto edilizio (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

A questo punto, dopo aver effettivamente individuato le voci da tenere in considerazione ai fini del calcolo, è opportuno ricordare che al di là della nomenclatura assegnata, ogni elemento individuato deve necessariamente essere preso in considerazione per un **minimo** di peso pari al 95% del peso totale dello stesso elemento tecnico (ad esempio, se viene considerata la voce “*infissi*” questa dovrà essere valutata per un peso pari almeno al 95% di tutti gli infissi impiegati). Per questo risulta fondamentale, durante la progettazione, avere la possibilità di una consultazione **agevolata** nei confronti delle masse in gioco, le quali potranno essere valutate attraverso unità di misura idonee alle loro funzioni (vale a dire di kg/m² nel caso di una parete o di kg/m nel caso di elementi come travi).

Inoltre, per tutti quegli elementi di dettaglio (assimilabili, ad esempio, a viti o guaine), che incideranno per meno del 5% del peso dell'elemento tecnico di appartenenza (come una parete), si associa un valore di EC di *una tantum* corrispondente al valore più alto di Embodied Carbon riferito alle fasi A1-A3.

Infine, si tiene a ricordare come all'interno di questa quota non potranno essere presi in considerazione tutti quei prodotti ad alta incidenza superficiale (maggiore del 20%) all'interno di strutture, chiusure verticali e partizioni. Questa specifica, risulta necessaria ai fini di non contemplare all'interno di elementi caratterizzati da un alto peso specifico elementi con un basso peso specifico (GBC Italia 2022d, pp. 27-28).

5.5. ULTERIORI ELEMENTI CARATTERIZZANTI PER UNA VALUTAZIONE DI WHOLE LIFE CARBON

Ai fini della contabilizzazione dell'indicatore è cruciale essere in grado di poter determinare il riferimento temporale che il calcolo stesso avrà. A supporto di tale decisione, vi sono diversi documenti come Level(s) o la norma EN 15804:2021 (UNI 2021c), che determinano uno scenario di riferimento pari a 50 anni o, al più, 60 anni per i manufatti residenziali.

L'unità temporale è **fondamentale** ai fini, ad esempio, di poter condurre operazioni di *benchmarking*, quindi di comparazione in termini di CO_{2eq} tra due soluzioni diverse o per attuare un'analisi di CO_{2eq} emessa in atmosfera entro il 2050 o, infine, per valutare anche le azioni di *replacement* di un elemento (RICS 2023, pp. 42-43).

D'altro canto, si ricorda che sotto il punto di vista metodologico è fondamentale distinguere il concetto di ciclo di vita utile con quello di scenario temporale di riferimento. Infatti, il primo è da intendersi come il momento limite oltre cui il manufatto non risponde più alle esigenze a lui ascritte (NTC 2018, capitolo 2), mentre con il secondo si intende il periodo che, in considerazione della destinazione d'uso e delle caratteristiche materico-tecnologiche del manufatto, è opportuno considerare per la valutazione e conseguentemente per il calcolo.

All'interno di questa unità temporale verranno poi prese in esame, attraverso un'operazione di **inventario**, le voci di input e di output. Come descritto all'interno delle norme EN15978 ed EN14040, queste particolari voci

che le norme definiscono come *processo unitario*, ovvero il **flusso** che lega queste due voci. Un esempio di questo processo può essere il caso di una risorsa energetica (input) che, tramite ad esempio combustione, genera una emissione in atmosfera (output).

Per questo motivo, oltre la definizione di una unità temporale è parallelamente importante definire una unità di misura idonea al conteggio della EC, ad esempio, nel caso di un manufatto edilizio con funzione abitativa. Nel caso residenziale, infatti, il calcolo dell'*Embodied Carbon* si basa su un'azione di normalizzazione relazionata alla sua Superficie Utile Lorda; ciò permetterà di ottenere un conteggio delle emissioni basato sul $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$, mentre per il conteggio ad esempio di EC relativo ad una generica infrastruttura si procederà con una normalizzazione rispetto ai km (ad esempio i km di autostrada realizzata), che quindi corrisponderà $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ (RICS 2023, pp. 125-126).

Infine, si ricorda come anche una delimitazione dei confini territoriali in cui saranno svolte le operazioni di cantiere, risulta essere necessaria ai fini di una WLCA, poiché all'interno di questo confine, che dovrebbe essere **allineato** con la destinazione d'uso e con i piani urbanistici cogenti, saranno poi prese in considerazione tutte le operazioni svolte, con le annesse emissioni di anidride carbonica equivalente prodotte. (RICS 2023, p. 43)

6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON E DELL'OPERATIONAL CARBON DI UN MANUFATTO EDILIZIO

In questo sesto capitolo, si presenteranno le metodologie impiegabili ai fini di una rendicontazione degli indicatori Embodied Carbon e Operational Carbon, per ogni fase del ciclo di vita di un edificio. Nel dettaglio, si presenteranno poi le modalità secondo cui poter effettuare il bilancio delle emissioni di CO_{2eq} per la contabilizzazione del valore conclusivo di Whole Life Carbon.

6.1. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI PRECOSTRUZIONE (A0)

Come descritto all'interno del documento *Whole Life Assesment- 2nd Edition* (RICS 2023) da parte del *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS) nel 2023, i modelli per la rendicontazione dell'indicatore di *Embodied Carbon* dovrebbero contenere tutte le fasi presentate all'interno della norma EN 15643

(UNI 2021b), il che significa che la prima fase a dover essere presa in considerazione è quella riferita alla fase di precostruzione, contraddistinta dal codice alfanumerico "A0".

Ciononostante, si ritiene la rendicontazione di questa fase come un momento trascurabile poiché contenente azioni (come acquisizione di terreni o studi preliminari) **non** capaci di apportare grandi contributi in termini di kgCO_{2eq} (RICS 2023, p. 70).

6.2. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI PRODUZIONE (A1-A3)

La prima fase oggetto di studio in termini di contabilizzazione è quella della produzione (A1-A3) con la quale, come spiegato all'interno della già citata norma EN15978:2011, si intende un processo che concorre alla realizzazione di un manufatto edilizio, tenendo in conto le fasi di estrazione, trasporto e trasformazione.

Per la contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica equivalente riferita a questa fase, si attua sempre una **differenziazione** tra un conteggio tramite metodo base e un altro tramite metodo avanzato, in cui si ricorda che la distinzione sarà dettata da un diverso livello di dettaglio e conoscenza del progetto, oltre che da un coinvolgimento maggiore o inferiore dei professionisti in gioco.

Detto ciò, la valutazione della EC_{A1-A3} sotto il punto di vista matematico non cambia poiché in entrambi i due metodi si prende in considerazione la medesima formula [1]:

$$[1] EC_{A1-A3} = \sum_{j=1}^n Mat_j * EC_{A1-A3-j} \text{ [kgCO}_2\text{eq]}$$

Dove per Mat_j si intende la quantità dei singoli materiali che concorrono alla realizzazione di un manufatto edilizio con unità di misura kg, mentre per EC_{A1-A3j} si intende l'*Embodied Carbon* dei singoli materiali che concorrono alla realizzazione di un manufatto edilizio, con unità di misura kgCO_{2eq}/kg.

Nel caso in cui si fossero prodotti degli elaborati scritto-grafici che possano permettere

la effettiva comprensione dello svolgimento del cantiere (quindi elaborati di *design as built*), la determinazione della voce Mat_j potrà essere arricchita con l'impiego di un **fattore** f_{pro} (fattore correttivo di produzione) all'interno del quale saranno presi in esame, per i singoli materiali impiegati, il **potenziale valore** di rifiuti generati all'interno del cantiere.

Quindi, tradotto in formula matematica:

$$[2] Mat_j = Mat_{j-DaB} + (Mat_{j-DaB} * f_{A1-A3}) \text{ [kg]}$$

Dove per Mat_j si intende la quantità in kg di materiale consegnato al cantiere, Mat_{j-DaB} è il quantitativo in kg di materiale previsto per il progetto e infine per f_{pro} si intende quel fattore correttivo che individuerà in percentuale il quantitativo di materiale considerabile generalmente come **scarto**.

All'interno di questa fase, attraverso l'ausilio della PAS 2050-2008 (BSi 2008) è possibile quantificare anche l'EC associata all'impiego di materiali riciclati, quindi:

$$[3] EC_{A1-A3} Mat_{jrc} = \sum_{j=1}^n (1-R_j) * EC_{pro-j} + (R_j * EC_{Rec-j}) \text{ [kgCO}_2\text{eq]}$$

In cui con $EC_{A1-A3} Mat_{jrc}$ si indica la EC associata al prodotto riciclato (kgCO_{2eq}), per R_j la percentuale di riciclato utilizzato, per E_{pro-j} l'EC associata alla materia prima utilizzata nella fase di produzione del materiale impiegato all'utilizzo di materia prima durante la realizzazione del materiale j e infine per E_{ric-j} l'EC associata al processo di **trasformazione** che ha permesso nel processo di produzione di impiegare della materia prima seconda (GBC Italia 2022d,

pp. 38-43).

6.3. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI COSTRUZIONE (A4-A5)

All'interno di questa fase sono riconducibili le azioni volte al trasporto in cantiere dei materiali e alla costruzione del manufatto edilizio oggetto di studio. Per questo motivo si preferisce **dividere** la trattazione secondo questi due momenti.

La prima ad essere trattata sarà perciò quella riguardante il trasporto, per poi passare alla fase di costruzione.

6.3.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO AL CANTIERE (A4)

La contabilizzazione dell'EC riferita al trasporto si avvale, come visto in precedenza, di due metodi di valutazione: base e avanzato. Il metodo base individua in forma essenziale le distanze percorse e le tipologie di mezzo impiegato, mentre il metodo avanzato si avvale di specifiche in merito, ad esempio, alle caratteristiche dei materiali da trasportare.

Tuttavia, entrambe le metodologie conservano lo stesso *iter* procedurale per la contabilizzazione dell'EC, che viene proposto nella norma EN 16258:2013 (UNI 2013).

Nel dettaglio, la procedura consta di **sette** momenti principali (GBC Italia 2022d, pp. 47-52):

STEP 1 *Identificazione della tipologia di trasporto*

In questo primo passo vengono individuate

le tipologie di mezzo possibili, prendendo in considerazione anche i carburanti e le unità di misura correlati, ma non solo; infatti, fondamentale fin da subito è l'identificazione anche della portata massima trasportabile dai mezzi scelti, al fine di poter individuare successivamente i viaggi **necessari** al trasporto in cantiere del materiale. Tali valori possono essere consultati all'interno della Tabella 18.

STEP 2 *Calcolo del numero di viaggi necessari al trasporto*

In questo *step* vengono identificati il numero di viaggi totali necessari individuati grazie alla presa in considerazione del **totale** delle tonnellate da trasportare e il totale delle tonnellate trasportabili dal mezzo scelto. Ancora una volta, per la determinazione di questi valori si rimanda alla Tabella 18.

STEP 3 *Determinazione delle distanze*

In questa sezione invece si individuano le **distanze** che corrono dal sito di produzione di un materiale al sito di costruzione, andando così a definire sinteticamente ed efficacemente se il materiale impiegato è all'interno di un contesto di produzione locale (50 km), nazionale (300 km), europea (1500 km) o globale (2000 km).

STEP 4 *Identificazione delle caratteristiche del viaggio su gomma*

All'interno di questo passo si individuano le **caratteristiche** di viaggio che un mezzo di trasporto dovrà sostenere; quindi, ad esempio, se sarà prevalentemente un viaggio sostenuto su territorio collinare o pianeggiante, ma non

solo. Infatti, all'interno di questo *step* si individuano anche altri tre parametri definiti come: parametro A, B e C. Il primo parametro sostanzialmente indica il consumo di litri di carburante a carico vuoto per ogni 100 km, il parametro B esprime la differenza tra il veicolo al massimale del suo carico e il veicolo scarico e infine l'ultimo parametro C, il quale indica in tonnellate l'ammontare del carico massimo ammissibile dal mezzo, come chiaramente descritto all'interno della Tab. 17.

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

Tab.17 Tipologia di mezzi secondo UNI EN 16258:2013 (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

STEP 5 Calcolo del consumo specifico

In questo *step* si definiscono i consumi relativi al mezzo di trasporto; qualora dovesse trattarsi di mezzi su rotaia o su mare ci si può affidare a valore tabellari definiti dalla EN 16258:2013, i quali indicano dei **consumi specifici** che si differenziano a seconda delle modalità di stoccaggio dei materiali all'interno

dei mezzi (ad esempio impilati leggeri, pesanti o sfusi), per i mezzi su gomma invece ci si può affidare alla seguente formula:

$$[4] E = A \left[\frac{l}{1000 \text{ km}} \right] + B \left[\frac{l}{1000 \text{ km}} \right] * \left[\frac{N(t)}{C(t)} \right] \left[\frac{l}{1000 \text{ km}} \right]$$

Dove per E si indica il consumo specifico del mezzo su gomma, per A (come detto precedentemente) si intende il consumo di carburante a mezzo vuoto, per B la differenza del mezzo a pieno carico e a vuoto, N sta ad indicare il carico trasportato e infine C il massimo carico utile del mezzo.

STEP 6 Calcolo del consumo del mezzo

In questo sesto punto si determina invece il consumo del mezzo. Questo può essere calcolato secondo **due** diverse formule. Per il trasporto su gomma:

$$[5] F = D \frac{[km] * E \left[\frac{l}{1000 \text{ km}} \right]}{100} [l]$$

Per il trasporto su rotaia o su mare:

$$[6] E = P [t] * D [km] * E \left[\frac{kWh}{1000 \text{ km}} \right] \text{ o } \left[\frac{l}{1000 \text{ km}} \right] \text{ o } \left[\frac{kg}{1000 \text{ km}} \right] [kWh] \text{ o } [l] \text{ o } [kg]$$

Dove per F si intende in generale il consumo del mezzo, per P le tonnellate del materiale da trasportare, per D la lunghezza del percorso e, infine, con E il consumo specifico.

STEP 7 *Calcolo della ECA4*

In questo ultimo *step* si procede al calcolo dell'*Embodied Carbon* associabile alla fase A4, la quale è **somma aggregata** di tutte le emissioni di tipo 1 e 2 (quindi dirette e indirette) relative al trasporto. Quindi il calcolo risulta essere:

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

[kgCO₂eq]

Dove per *F* si richiama al consumo del mezzo, che ricordiamo può essere espresso in kWh oppure in kg a seconda della tipologia del mezzo e dove *gW* indica il coefficiente di emissione diretta o indiretta **associabile** alla fase A4, il cui valore può essere ricavato dalla Tab. 18 a sua volta desunta dalla norma di riferimento WTW (*Well to Wheels*) (U.S Department of Energy 2022).

È importante specificare, infine, che la

metodologia presentata è anche impiegabile all'interno della fase Ec2 ovvero trasporto a fine vita, che verrà affrontata in un secondo momento all'interno della fase C al fine di poter contabilizzare la WLC del manufatto edilizio in questione.

6.3.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI FASE DI COSTRUZIONE (A5)

In questa fase invece ci troviamo all'interno del cantiere, quindi saranno prese in tutti i processi che una volta portati a compimento permetteranno la **realizzazione** del manufatto architettonico (GBC Italia 2022d, pp. 53-57).

Per la rendicontazione dell'EC di questa fase si ribadisce la **possibilità** di un approccio base ed uno avanzato.

A prescindere da quale metodo sarà adottato, in **entrambi** gli approcci si prenderà a riferimento dei valori tabellari di emissione specifica riguardanti le differenti tipologie di mezzo impiegati (comunemente definiti "*off-roads*" ossia mezzi impossibilitati a circolare su strada).

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 i Fattori di emissione ISPRA		-

Tab.18 Coefficienti di emissione specifica gW per differenti tipologie di combustibili (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

Naturalmente, il tipo e il numero di mezzi considerati ai fini del calcolo dell'EC sono una conseguenza delle scelte e della possibilità nel reperire **informazioni** da parte del progettista che, dichiarandolo, potrà escludere alcuni di questi dalla contabilizzazione finale dell'indicatore.

La procedura consta di **cinque steps** fondamentali.

STEP 1 *Calcolo del volume e del peso totale di un determinato elemento, materiale o componente*

All'interno di questa sezione fanno riferimento tutti quei calcoli circa l'individuazione del volume e del peso di ogni **singolo** materiale impiegato (ad esempio cemento, sabbia e ghiaia) che, attraverso l'utilizzo di determinati macchinari (ad esempio betoniere) concorreranno alla realizzazione di un unico e nuovo elemento (come il calcestruzzo).

STEP 2 *Identificazione delle attrezzature, dei mezzi e del numero di ore di utilizzo*

In questo *step* si identificano tutti gli strumenti necessari per la realizzazione di un determinato elemento (ad esempio il calcestruzzo) andando anche ad individuare tramite tabelle empiriche il numero di ore di utilizzo necessarie alla realizzazione di questo elemento, potendone stimare così il **consumo orario** della risorsa energetica impiegata.

STEP 3 *Calcolo delle emissioni orarie*

All'interno di questo passo si individuano le emissioni orarie associate all'impiego di un

determinato macchinario basandosi su *report* o valori tabellari esistenti, come ad esempio i valori *South Coast Air Quality Management District* (SCAB) (SCAB 2023). Per poter desumere il quantitativo di emissioni orarie attraverso il foglio SCAB, come nel caso di un macchinario alimentato a gasolio, si procederà quanto prima ad individuare il mezzo **impiegato**, prendere in esame il valore di dato medio aggregato per la voce CO₂ e CH₄ (unici gas climalteranti presi in considerazione), per poi moltiplicare tali dati per il numero di ore di utilizzo dei macchinari e convertendo, infine, il valore in kgCO_{2eq}.

Qualora si intendesse fare il calcolo di emissioni orarie di un macchinario alimentato ad energia elettrica sarà da prendere in considerazione il **mix** di risorse primarie energetiche italiano impiegando fattori di emissione, ad esempio messi a disposizione all'interno della banca dati TERNA.

STEP 4 *Conversione dell'unità di misura dell'emissioni di metano*

A questo punto, ai fini di procedere con l'aggregazione dei risultati fin qui ottenuti, si passa alla **conversione** delle emissioni in metano in emissione di anidride carbonica equivalente, attraverso un fattore di conversione proposto all'interno del *report* del 2013 da parte della IPCC (IPCC 2013) che risulta essere pari a 28.

La formula è come segue:

$$[8] \text{ Emis. di CH}_4 = \frac{A [\text{hr}] * B \left[\frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right]}{2,205} * f_c [\text{kgCO}_2\text{eq}]$$

Dove per A si intende la produzione oraria del macchinario, B l'emissione oraria media aggregata e per f_c il fattore di conversione del metano.

STEP 5 *Calcolo dell'EC_{A5}*

In questa ultima sezione non si fa altro che sommare il quantitativo delle emissioni riscontrate e calcolate nel corso della fase di **costruzione**.

Come scritto all'inizio della trattazione della fase A5, all'interno del metodo base o avanzato non si riscontrano delle sostanziali differenze sotto il punto di vista metodologico dei 5 *steps* sopra proposti. Nonostante ciò, qualora fossimo all'interno di un approccio avanzato, si ritiene opportuno andare a considerare delle precisazioni per gli step 2 e 3.

STEP 2 AVANZATO *Identificazione delle attrezzature, dei mezzi e del numero di ore di utilizzo*

All'interno di questo *step* si ritiene opportuno affinare la scelta del macchinario prendendo in considerazione anche la sua potenza in kW necessaria allo svolgimento di una data operazione.

STEP 3 AVANZATO *Calcolo delle emissioni orarie*

In questa parte seppur rimanendo invariata la metodologia prima proposta, si ritiene opportuno utilizzare, a fronte di specifiche di progetto e di dettaglio sull'impiego puntuale dei macchinari, un dato di emissione che non solo sia riferito ad una tipologia di macchinario,

bensì che sia correlato anche alla **potenza** dello specifico macchinario utilizzato. Tale operazione viene sempre impiegata tramite ausilio di fogli SCAB.

Oltre ciò, si ricorda come attraverso opportune tabelle (vedi paragrafo precedente) ad oggi è anche possibile effettuare una stima del EC_{CW}, ovvero di tutti quei materiali che giunti sul cantiere a seguito di lavorazioni o di errori di progettazione generano dei **rifiuti** (Tab. 19). L'emissione in questa fase di tali rifiuti, che secondo la normativa italiana sono da definire come *rifiuti speciali*, permette di anticipare già in questo momento di cantierizzazione le fasi di rifiuto C₃-C₄, accrescendo così anche la consapevolezza del progettista.

Materiale/Prodotto	Percentuali di rifiuto
Calcestruzzo realizzato in sito	5%
Calcestruzzo prefabbricato (ad esempio travi)	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 di legno (travetti e tavole)	10%
Cartongesso	22,5%
Protezioni antincendio cementizia a spruzzo	10%

Tab. 19 Percentuali di rifiuti da costruzione rispetto al totale (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

Infine, si precisa che la metodologia appena proposta può anche vedere il suo impiego nella fase di demolizione, ovvero la fase EC_{C1}, ma che, tuttavia, la sua contabilizzazione deve essere separata rispetto a quella dell'EC_{A5} ai fini di un calcolo più **consapevole** degli apporti che ogni azione ha in termini di impatto.

Naturalmente, i due valori saranno infine aggregati per la rendicontazione totale della WLC.

6.4. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI USO (B1 -B5)

La fase di uso è un momento del processo che consta, in accordo con quanto descritto dalla norma EN 15978:2011 (UNI 2011), da 5 sottofasi: uso (B1), manutenzione (B2), riparazione (B3), sostituzione (B4) e infine ristrutturazione (B5). All'interno di questo momento è fondamentale, perciò, prendere in considerazione non tanto i dati afferenti al computo metrico (ovvero *Bill of Quantity*), bensì i quantitativi di materiali **effettivamente** impiegati, quindi, riscontrabili nel *Design as built*. Ne risulta che la fase di Sostituzione (B4), non potrà fare riferimento al *DasB* e, pertanto, contabilizzata secondo i dati di *Bill of Quantity* (BoQ).

A questo punto si passerà ad una trattazione puntuale delle singole *Embodied Carbon* appartenenti alla fase B (B1-B5).

6.4.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI USO (B1)

La fase di uso, essendo una fase che in generale fa capo ad un'azione svolta secondo un periodo "t", ha una forte **relazione** con quello che è stato definito precedentemente come *scenario temporale di riferimento*.

Al fine di poter quantificare le emissioni in atmosfera di anidride carbonica equivalente associate alla fase di utilizzo, vengono prese in esame, ad esempio, le **emissioni** dovute agli impieghi di vernici, l'assorbimento di CO₂ dovuta a fenomeni di carbonatazione del calcestruzzo

o gli assorbimenti dovuti all'impiego di superfici vegetali di copertura o, più rari, di perimetrazione verticale.

La procedura di tipo base per la rendicontazione della EC si suddivide in due momenti (GBC Italia 2022d, pp. 57-59).

STEP 1 *Identificazione delle sostanze, dei materiali e degli strati funzionali*

All'intero di questo *step* si vanno ad individuare, per poi classificarli, i materiali o i prodotti impiegati in grado di assorbire, stoccare o emettere in atmosfera gas ad effetto serra come: cemento, rivestimenti in grado di emettere o assorbire CO_{2eq} (come strati di finitura vegetali) o elementi MEP (*Mechanical, Electrical e Plumbing*).

STEP 2 *Calcolo dell'EC_{B1}*

In questa fase, attraverso l'impiego di fattori di emissioni specifica e attraverso l'**inquadramento** di queste emissioni all'interno dello scenario temporale di riferimento, è possibile quantificare le emissioni rilasciate in atmosfera; inoltre, possono e devono essere quantificate anche le quantità di CO_{2eq} **assorbita** dall'elemento vegetale impiegato.

Questo tradotto in formula, suggerisce la formula [9]:

$$[9] EC_{B1} = \sum_{j=1}^n [GHG_j * FES_{B1-j}] - CU_{B1-j} - CO_S_{B1-j} \text{ [kgCO}_2\text{eq]}$$

Dove per n si intendono i numeri di anni dello scenario temporale di riferimento, *GHG_j*

corrisponde alle emissioni comportate dall'utilizzo della j-esima sostanza di un determinato elemento tecnico, FES_{B1-J} è il fattore di emissione specifica della j-esima sostanza emessa dall'elemento, CU_{B1-J} è la quantità di CO_{2eq} assorbita dai materiali a base cemento, mentre, infine, per CO_S_{B1-J} si intende la quantità di CO_{2eq} assorbita dall'impiego di elementi vegetali.

All'interno del metodo avanzato poi, non si riscontrano differenze metodologiche degli *steps* appena proposti. Ciononostante, si ricorda che il metodo avanzato basandosi su un impiego più consapevole dei materiali da utilizzare dovrebbe fondarsi su dati forniti e riscontrabili in **banche dati** specifiche o basarsi sull'impiego di EPD.

6.4.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI MANUTENZIONE (B2) E RIPARAZIONE (B3)

Le fasi di manutenzione e riparazione, naturalmente sempre correlate con lo scenario temporale di riferimento, hanno l'obiettivo di

calcolare il valore di EC comprensivo di tutte quelle azioni e operazioni atte a ripristinare i livelli **originari** prestazionali degli elementi realizzati, come ad esempio: azioni di pulizia o di tinteggiatura (tenendo presente anche i fabbisogni energetici necessari al compimento di queste), produzione e trasporto dei materiali impiegati o generazione di rifiuti provenienti da queste operazioni (spesso trascurabili) (Tab. 20). A tal proposito, perciò, risulta oggi estremamente necessario redigere in fase di progettazione un piano di manutenzione **programmato** con l'intento di decifrare con anticipo gli impatti che queste fasi avranno in termini di CO_{2eq} .

Come per tutte le fasi descritte fino ad ora, si ripresenta nuovamente la dicotomia tra metodo base e metodo avanzato. All'interno del primo, essendo sprovvisti di piani particolari per le fasi in esame, è possibile fare una stima di **massima** della CO_{2eq} , andando ad impiegare delle formule che a seconda delle destinazioni d'uso possono prendere in considerazione valori riguardanti la EC di fasi precedenti o ad esempio valori circa la *SLP*.

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

Tab.20 Determinazione dell'EC per le fasi di Manutenzione e Riparazione di un manufatto (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

Per quanto riguarda invece il metodo avanzato, questo permette, e conseguentemente richiede, che i valori desunti da schede tecniche ambientali siano **interpolati** e interpretati al fine di poter desumere i valori riguardanti le fasi B2 e B3 (GBC Italia 2022d, pp. 64-67). La metodologia prevista, nel caso del metodo avanzato, consta di due *steps* fondamentali.

STEP 1 *Identificazione degli elementi tecnici e di impianto*

All'interno di questa fase vengono sostanzialmente presi in considerazione tutti quegli elementi (che fanno riferimento alla Tab. 17) bisognosi di un'azione atta ad **eliminare** lo stato di obsolescenza.

STEP 2 *Calcolo della EC*

Il calcolo dell'indicatore avviene attraverso la determinazione dei **fabbisogni** di energia elettrica di cui gli strumenti impiegati necessitano, per poi moltiplicarli con il valore di *fattore di emissione* corrispondente, considerano presente lo scenario temporale di riferimento. In un secondo momento, poi, si individuano invece quelle che sono le **quantità** che necessitano di un'azione di manutenzione e riparazione: a queste quantità sarà poi assegnato il valore di EC corrispondente. Infine, si dovrà moltiplicare questo ultimo valore ottenuto per il numero di volte secondo cui queste operazioni dovranno essere **ripetute** nel corso degli anni. Tradotto matematicamente:

$$^{[10]} EC_{B2-B3} = \sum_{j=1}^n [FEI_{B2-B3-j} * FES_{B2-B3-j}] + EC_{B2-B3-j} + EC_{A1-A5-j} [kgCO_2eq]$$

Dove per FEI_{B2B3-J} si intende il fabbisogno energetico richiesto dalle operazioni di manutenzione e riparazione della j-esima componente, tenendo in considerazione anche il **numero** di volte che, durante gli anni programmati, queste operazioni richiederanno energia. Per FES_{B2B3-J} si intende il fattore di conversione di emissione specifica. Invece, con EC_{B2B3-J} si fa riferimento alla EC riferita al j-esimo elemento durante le fasi B2 e B3 del ciclo di vita, anche questa moltiplicata per il numero di interventi di manutenzione o riparazione previste nel corso degli anni.

Infine, troviamo EC_{A1A5-J} ovvero la Embodied Carbon delle fasi A1-A5 del j-esimo materiale sostituito o riparato, tenendo in considerazione il numero di interventi di manutenzione o riparazione previste nel corso degli anni.

6.4.3. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI SOSTITUZIONE (B4)

La fase di sostituzione fa riferimento a tutte quelle **azioni volte** alla sostituzione e alla reinstallazione, totale o parziale, di un elemento tecnico o di impianto, la cui durata risulta essere inferiore se comparata con gli anni dello scenario temporale di riferimento dell'edificio.

Tali azioni, sono volte a garantire le prestazioni funzionali e di comfort del manufatto. Come per la B2 e la B3, anche in questa fase B4 vengono prese in esame le emissioni di *Embodied Carbon* associate non solo al momento della sostituzione bensì anche a tutte quelle emissioni conseguenti alla realizzazione del materiale che **subentrerà**, del trasporto di questo nel sito di costruzione, della sua posa in opera, del trasporto e del

trattamento di tutti i rifiuti prodotti dalla sostituzione dell'elemento obsolecente con il nuovo (GBC Italia 2022d, p. 68).

Come già precedentemente effettuato, si partirà dalla presentazione del metodo base per poi analizzare la procedura del metodo avanzato.

Il metodo base prevede due *steps* sequenziali.

STEP 1 *Determinazione della durata dei materiali, dei prodotti e degli elementi tecnici di impianto*

In questo primo passaggio vengono individuati per tutti i materiali e prodotti, il numero di anni secondo cui tali elementi possano garantire delle prestazioni soddisfacenti in accordo a quanto prescritto dalle norme. Tali valori, possono essere riscontrati tramite la

consultazione di opportune banche dati. In caso di limitata reperibilità di dati in merito alla durata dei materiali, possono essere utilizzati i valori contenuti nella Tab. 21.

STEP 2 *Calcolo dell'EC_{B4}*

Il calcolo dell'indicatore avviene sommando le emissioni di CO_{2eq} equivalenti comprese tra A1-A5 e C2-C4 corrispondenti al materiale che si intende sostituire, per poi moltiplicare tale somma con un fattore specifico definito come *fattore di sostituzione* associato al materiale, che indica il **numero di sostituzione** previste (RF_{B4-j}) e che si ottiene andando a considerare il numero di anni stimati di un dato materiale (MEL_j) rispetto allo scenario di riferimento temporale (STR), sottraendolo ad un valore unitario. Quindi, tradotto:

$$[11] RF_{B4-j} = \left[\frac{STR}{MEL_j} - 1 \right]$$

Natura del componente	Scenario temporale di riferimento	Esempi
1 Fornisce stabilità strutturale	50 anni	• Pareti portanti
2 Difficile da sostituire		• Membrane poste al di sotto delle strutture portanti
3 Guasto non rilevabile mediante le normali operazioni di manutenzioni		• Tubazioni interraste • Tiranti posti dietro la struttura portante
1 Moderatamente difficile da sostituire	15 anni	• Copertura del manufatto edilizio
2 Guasto non rilevabile durante l'uso quotidiano del manufatto edilizio		• Sigillanti, guarnizioni e profilati
1 Facile da sostituire	5 anni	• Rivestimento e rifiniture
2 Guasti visibili		• Grondaie

Tab.21 *Durata stimata di materiali, prodotti ed elementi tecnici nel ciclo di vita di un manufatto (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])*

Mentre per l'EC_{B4} vale quanto segue:

$$[12] EC_{B4} = \sum_{j=1}^n [(EC_{A1-A3-j} + EC_{A4-A5-j} + EC_{C2-C4-j}) *]$$

* RF_{B4-j}] [kgCO_{2eq}]

Dove si precisa che le fasi A sono riferite a valori riconducibili al *Bill of quantity*, mentre la fase C al *Design as built*, inoltre (come descritto all'inizio del paragrafo) le fasi A1-A3 sono da considerarsi come scenario di applicazione minimo per la rendicontazione.

Infine, per il metodo avanzato non si palesano differenze con quanto descritto precedentemente, se non la presenza e l'elaborazione di un **dettagliato** piano di manutenzione che possa facilitare la determinazione del numero di volte in cui un dato elemento subisca una sostituzione, oltre che naturalmente all'impiego di certificazioni ambientali che possano contenere al loro interno informazioni sulla EC della fase B4.

6.4.4. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI RISTRUTTURAZIONE (B5)

In questa fase si fa riferimento al conteggio della EC emessa al fine di compiere un'azione di ristrutturazione e di rifacimento di una porzione, anche significativa, di un manufatto architettonico.

All'interno di questa fase, che può essere anche corredata da un piano **programmato** di ristrutturazione, sarà richiesto quindi di individuare i materiali o le componenti che saranno oggetto di ristrutturazione, conteggiando successivamente le diverse EC

(EC_{A1-A5} EC_{C-C4}) di tutti i nuovi materiali impiegati (RICS 2023, pp. 92-93).

6.5. CONTABILIZZAZIONE DELL'OPERATIONAL CARBON NELLA FASE DI USO (B6)

All'interno di questa fase si procederà con la descrizione della metodologia adatta per la rendicontazione dell'*Operational Carbon* durante le fasi del ciclo di vita B6-B7.

Per il compimento di questa descrizione è risultato fondamentale il documento pubblicato nel corso del 2023 dal LETI e dal titolo *Operational Carbon in Whole Life Carbon Assessments* (LETI 2023a).

Il rapporto del LETI spiega, infatti, come per un corretto *accounting* del Carbonio Operativo sia fondamentale svolgere innanzitutto un'analisi in merito al **quantitativo** di *Operational Energy* richiesta dall'edificio, per poi successivamente **convertire** questo valore definito come di *Energy Use Intensity* (EUI) espresso in kWh, in un valore di kgCO₂ ovvero di emissioni di Carbonio Operativo (LETI 2023a, p. 1).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Operational} \\ \text{Energy} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Fattore di} \\ \text{Emissione di} \\ \text{Carbonio} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Emodied Carbon} \end{array} \right) = \text{Whole Life Carbon}$$

Inoltre, per quanto riguarda il procedimento necessario per la comprensione del valore di *Operational Energy*, si tiene a citare un secondo rapporto pubblicato sempre dal LETI nel corso del 2023, dal titolo *Operational Modelling Guide* (LETI 2023b). All'interno del *report*, l'Istituto britannico spiega in maniera dettagliata il procedimento necessario per una **modellazione**, ovviamente a carattere

energetico, che possa essere in grado di sintetizzare quelle che sono le caratteristiche prestazionali del progetto. Una corretta modellazione, infatti, risulta necessaria al fine di eliminare il *performance gap* spesso riscontrato tra gli **intenti** progettuali e la realtà effettiva e, conseguentemente, permettere un abbassamento delle richieste energetiche dell'edificio attraverso una esamina delle possibili opzioni di progetto realmente capaci di ridurre il quantitativo di energia operativa richiesta (LETI 2023b, p. 20).

All'interno del già citato documento per una corretta modellazione e desunzione dell'indicatore di *Operational Energy*, il LETI fornisce come metodologia di riferimento la TM54:2022 sviluppata dal *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE) (CIBSE 2022). Proprio tale metodologia è stata dettagliatamente analizzata in questo lavoro di Tesi all'interno del *BOX 2*.

Una volta quindi, desunto il valore di energia operativa, sarà anche chiaramente desumibile il valore corrispondente di Carbonio Operativo attraverso una conversione ottenibile per mezzo di un **fattore di emissione specifica**.

Infatti, come descritto nel documento *Operational Carbon in Whole Life Carbon Assessments*, il LETI prevede che la conversione da Energia Operativa a Carbonio Operativo possa avvenire attraverso l'impiego di un fattore di carbonio **suddiviso** (ovvero di uno *split carbon factor*) (LETI 2023a).

L'adozione di tale fattore permetterà infatti lo sviluppo di un metodo di conversione semplice, facilmente modificabile e potenzialmente

applicabile a tutte le destinazioni d'uso (LETI 2023a, p. 22).

Nel dettaglio, all'interno del documento si spiega che, qualora si avesse un quantitativo di *Operational Energy Totale*, (calcolato attraverso le analisi eseguite con la metodologia TM54:2022) maggiore dei target nazionali, il LETI suggerisce di suddividere tale quantitativo in due sottosezioni.

La prima, ovvero quella che **eccede** gli *standard* normativi, dovrebbe essere convertita in emissione di anidride carbonica attraverso un fattore di carbonio *non decarbonizzato* (desunto dal LETI all'interno della tabella 5.14 di DUKES e pari a 0,261 kgCO₂/kWh), mentre alla quota parte pienamente rientrante all'**interno** dei *target* energetici nazionali, le dovrebbe essere applicato un fattore di carbonio *decarbonizzato* (pari a 0,062 kgCO₂/kWh) (Fig. 22).

Difatti, questa metodologia, prevede l'impiego di un fattore di carbonio suddiviso per un duplice intento: da un lato premiare gli edifici che siano in grado di soddisfare le proprie esigenze con un impiego uguale o inferiore ai *target* proposti dalla normativa (agevolando così il processo di **decarbonizzazione** della fase operativa e riducendo la formazione di picchi di domanda), da un altro lato invece si cerca di integrare all'interno di una rendicontazione caratterizzata da uno scenario temporale di riferimento, nella maggior parte dei casi di 50 anni, una rete elettrica altamente decarbonizzata.

Tale accezione, infatti, seppur soggetta delle **incertezze** legate al suo sviluppo in un tempo futuro, può essere ritenuta di sicuro avvenimento e pertanto necessaria da

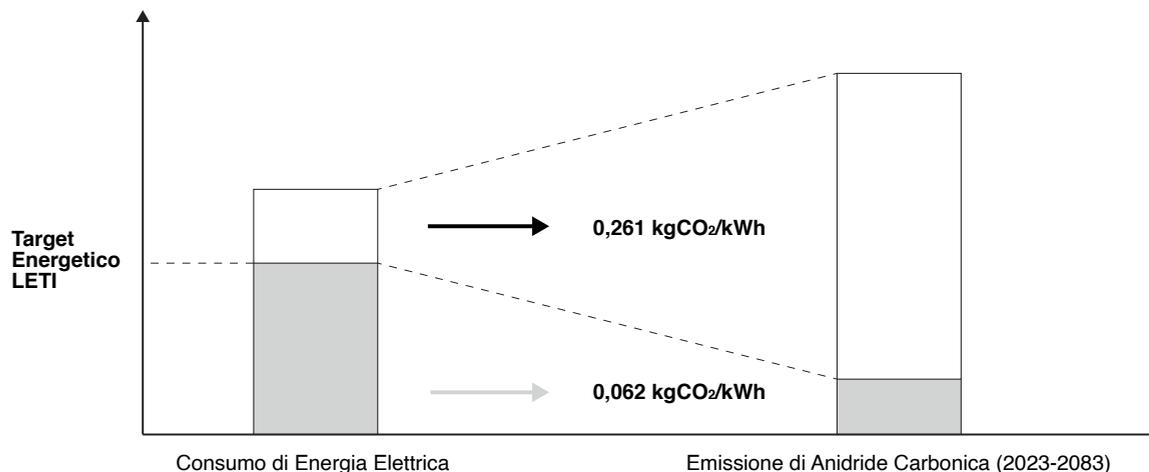


Fig.22 Esplicitazione della metodologia “split carbon factor” (elaborazione da parte dell’autore su fonte LETI [27])

rendicontare (LETI 2023a, p. 21).

Ciononostante, risulta necessario ricordare che il LETI, all’interno del suo *report*, specifici espressamente come tale rendicontazione proposta dovrebbe essere sempre accompagnata da altri **due** tipi di scenario ovvero: quello di una rete non decarbonizzata e di un secondo in cui la rete risulti completamente decarbonizzata. Tale inquadramento, infatti, permetterà di redigere una valutazione affetta da un minor grado di incertezza del dato di *output* e da una maggiore profondità di lettura del dato finale di OC (LETI 2023a, p. 6).

Qualora, invece, volessimo applicare a questa metodologia dei parametri caratteristici propri del sistema **italiano** potremmo ricorrere (per quel che concerne i *target* di consumo energetico per destinazioni d’uso residenziali) a quanto stabilito dal già citato *Decreto dei Requisiti Minimi* (Ministero italiano 2015).

All’interno della normativa, infatti, si asserisce che un edificio di nuova costruzione dovrebbe avere come soglia massima di consumo energetico annuo il 40% dell’EPgl (ovvero indice di prestazione energetica globale, espresso in kWh/m² annuo) dell’edificio di riferimento standard (o *avatar*), il quale, **conservando** le caratteristiche volumetriche dell’edificio da valutare, fungerà da termine di paragone (e quindi da benchmark) per il calcolo.

Per quel che concerne invece, l’assegnazione di valori applicabili alle due voci dello *split carbon factor* il discorso diviene leggermente più complesso. Infatti, per il primo caso ovvero per il fattore di carbonio “non decarbonizzato” si potrebbero utilizzare i più **recenti** valori di emissioni di CO₂ per l’energia elettrica, i quali sono consultabili all’interno dell’ultimo report *Efficiency and Decarbonization Indicators in Italy and in the Biggest European Countries* (ISPRA 2023) pubblicato nel 2023 dall’ISPRA in cui, nella

Tabella 1.13, si può desumere come fattore di emissione specifica di carbonio, per la produzione di energia elettrica nell'anno 2022, il valore di 0,309 kgCO₂/kWh (ISPRA 2023, p. 88).

Per ciò che concerne invece il fattore di emissione specifica decarbonizzato, ad oggi **non** risultano presenti nei piani di decarbonizzazione che esplicitino un valore affidabile e condiviso dalla comunità scientifica nazionale; per questo motivo si invita alla consultazione dei fogli di calcolo opensource redatti dall' *ENERdata*, il quale all'interno del progetto *Global Energy & Climate Outlook 2050* ha pubblicato dei fattori di emissione specifica decarbonizzati, fino al 2050, anche per il caso europeo.

Nella fattispecie, si propone di prendere in considerazione **tre** differenti valori di emissione,

al fine di rendicontare le emissioni di CO_{2eq} in tre differenti momenti.

Per questo motivo, si presuppone necessario scandire tali valori **secondo** le date chiave presentate nella *Roadmap* per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni (riscontrabili all'interno della *EPDB recast*) ovvero: 2025, 2036 e 2050.

Il grafico sottostante (Fig. 23) riassume i valori dei fattori di emissione specifica decarbonizzati riscontrati.

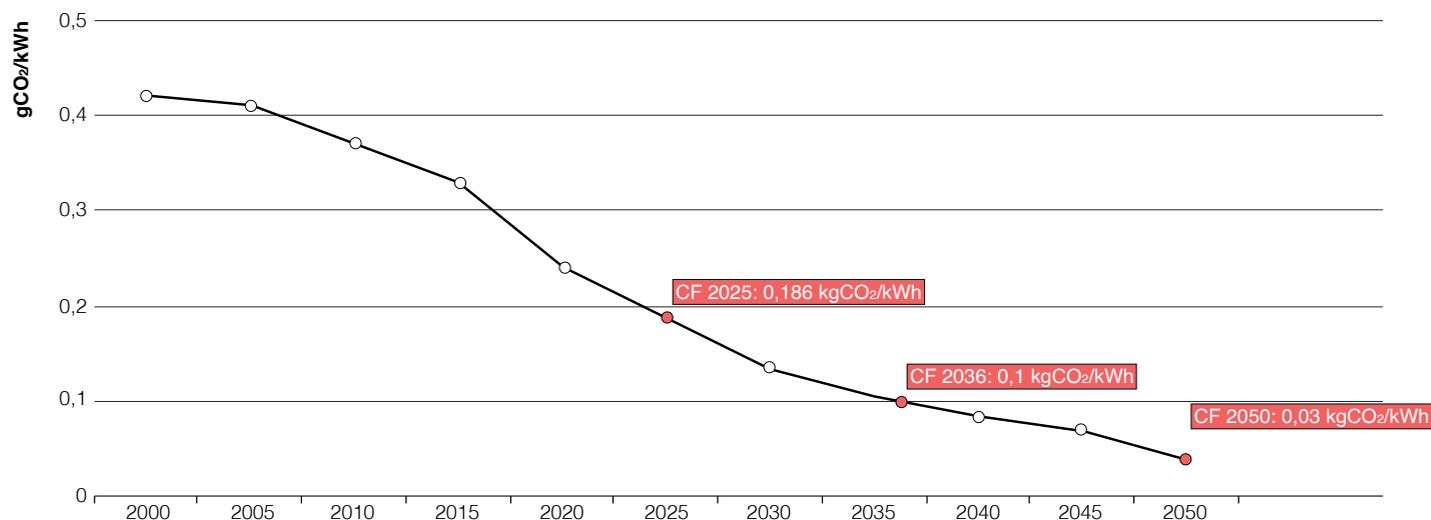


Fig.23 Andamento del fattore di emissione specifica decarbonizzato per la produzione di energia elettrica (trend europeo) (elaborazione da parte dell'autore su fonte <https://eneroutlook.enerdata.net/forecast-world-co2-intensity-of-electricity-generation.html>)

6.6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI FINE VITA (C1-C4)

La fase del fine vita, come descritto da normativa, prende in considerazione i processi di demolizione (C1), di trattamento dei rifiuti (C3) e infine dello smaltimento finale di questi (C4). All'interno di queste fasi oltre ad individuare l'effettivo **ammontare** dei rifiuti, che faranno capo naturalmente a quanto dichiarato dagli elaborati del *Design as built*, è possibile andare ad ipotizzare e calcolare anche le **implicazioni** comportate dalla scelta di diversi scenari di trattamento.

A questo punto, perciò, si passeranno in rassegna le diverse metodologie di calcolo per la valutazione dell'EC nelle diverse fasi (GBC Italia 2022d, pp. 73-79).

6.6.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI DEMOLIZIONE (C1)

Le azioni di demolizione sono per antonomasia le operazioni che più di tutte producono dei quantitativi di scarto classificabili come **rifiuti**. La produzione di scarti può però afferire a più fasi del ciclo di vita del manufatto e verificarsi, di conseguenza in diversi momenti temporali come nel caso della *Demolizione preliminare* (DP) ovvero la demolizione che, ad esempio, viene compiuta qualora vi fossero delle preesistenze da essere rimosse sul sito di costruzione.

L'*Embodied Carbon* della DP, definita EC_{C1DP} , verrà sì conteggiata nella fase C1, ma si riferirà alla fase A5; quindi, sarà una demolizione C1 riferita all'anno 0, ovvero l'anno di costruzione del prodotto in esame. Ulteriore azione di

demolizione da tenere in considerazione è anche quella riferita alla fase "B" ovvero la *demolizione in fase d'uso* (DU), possibile a causa di azioni di manutenzione o di sostituzione. In questo caso la EC, che prenderà il nome di EC_{C1DU} , sarà quindi riferita secondo un Δt comprensivo dalla fase di uso alla fase del fine vita. Per ultima, naturalmente, sarà presa in considerazione l'*Embodied Carbon* riferita alla demolizione del fine vita (DEol), definita EC_{DEol} corrispondente all'anno n della vita utile del manufatto.

Per questo motivo, dunque, la *Embodied Carbon* della fase C1 sarà individuata tramite il conteggio e l'aggregazione delle singole *Embodied Carbon* alle quali sarà poi associata, come nel caso della EC_{A5} , il corrispettivo in termine di emissioni di CO_{2eq} delle singole fasi che saranno poi **aggregate** al fine di valutare le EC della fase C1.

Il conteggio, naturalmente, si dividerà in seguito in un conteggio di tipo base o avanzato a seconda che le **informazioni** utilizzate provengano da valori tabellari o da documentazioni tecniche di dettaglio.

6.6.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO DEI RIFIUTI (C2)

All'interno di questa fase ritroviamo la stessa procedura descritta all'interno della fase A4 per il trasporto dei materiali in **cantiere**. Infatti, anche in questo caso l'obiettivo è di determinare le emissioni comportate dall'utilizzo di un mezzo di trasporto per condurre in discarica o in appositi centri di trattamento i rifiuti prodotti.

Naturalmente, per il trasporto a discarica risulta cruciale da parte del progettista fornire delle specifiche in merito alla **modalità** e i

luoghi secondo cui i rifiuti prodotti verranno smaltiti, poiché questo concorrerà ad un diverso valore finale di EC. In termini matematici, quindi, risulterà che la EC della fase C2 sarà:

$$[13] EC_{C2} \cong EC_{A4} = \sum F [kWh] [l] [kg] * \\ gW \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kWh} \right] \left[\frac{kgCO_{2eq}}{l} \right] \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kg} \right]$$

Dove per F si deve intendere in kW, l o kg il consumo del mezzo utilizzato mentre per gW si intende il coefficiente di emissione specifico del mezzo utilizzato. Tale formula è applicabile sia per il metodo base che all'interno del metodo avanzato, qualora all'interno del primo metodo vi fossero **assenze** di dati circa il luogo dei centri di trattamento dei rifiuti può essere impostato come valore di *default* 50 km.

6.6.3. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRATTAMENTO DEI RIFIUTI (C3) E SMALTIMENTO FINALE (C4)

All'interno di questa fase, al progettista è richiesto di effettuare una stima circa le modalità di trattamento e smaltimento dei rifiuti quantificati in precedenza. In particolare, è doveroso precisare che queste due ultime azioni, svolte sul sito di progetto, saranno naturalmente complesse da contabilizzare poiché indicheranno delle emissioni che saranno effettivamente prodotte **soltanto** durante l'ultimo anno dello scenario temporale di riferimento (ad esempio durante l'anno 50).

Proprio a causa di questo dilazionamento nel tempo, è buona norma che il progettista proponga **diversi** scenari di smaltimento dei rifiuti, che possano ad esempio essere lo

“scenario 100%”, ovvero quando la totalità dei rifiuti verrà trasportata in discarica, o dello “scenario 70-30%” in cui il 70% dei rifiuti prodotti sarà sottoposto ad intervento di recupero, mentre la **restante** quota si smaltirà in discarica.

All'interno di questi scenari sarà poi compito del progettista attuare delle specifiche scelte sui materiali, poiché è importante ricordare che a diversi materiali potrebbe corrispondere un diverso tasso di capacità di recupero e di reimpiego.

Come specificato nelle fasi precedenti, la produzione di rifiuti non è soltanto subordinata ad una fase di demolizione, bensì la produzione di questi può essere causata anche da azioni **precedenti**, che saranno ovviamente oggetto di rendicontazione all'interno di questa fase. Possibili produzioni di rifiuti ulteriori possono essere assimilate, come già visto, a delle fasi di costruzione ($EC_{C3+C4CW}$) definiti come “*construction waste*”, o da azioni di sostituzione, quindi tipologie di rifiuti definiti “*replacement waste*” ($EC_{C3+C4RW}$) e infine da azioni di demolizione, quindi “*demolition waste*” ($EC_{C3+C4DW}$).

Tradotti in formula:

$$[14] EC_{B1} = EC_{C3+C4CW} + EC_{C3+C4RW} + EC_{C3+C4DW} \\ [kgCO_{2eq}]$$

Per il conteggio effettivo delle emissioni, dovute genericamente alla produzione dei rifiuti, saranno poi assegnati dei valori di emissione specifica riferiti a diverse azioni di trattamento o smaltimento. In questa sede, si specifica che alcune azioni **possibili** sono ad esempio: azioni di incenerimento, di compostaggio, di trasporto

in discarica o di operazioni di riciclaggio.

In particolare, quest'ultima può essere intesa o come operazione di "riciclaggio aperto", in cui il rifiuto per divenire materia prima seconda viene sottoposto ad un'azione di riciclo identica a quella che lo ha generato o di "riciclaggio chiuso", in cui il materiale per poter essere reimpiegato viene sottoposto ad un processo **diversa** rispetto all'originale (come nel caso delle materie plastiche).

All'interno della tabella sotto riportata (Tab. 24), desunta dal database del *Department for Business, Energy & Industrial Strategy* (BEIS) (UK Department 2023), sono riassunti alcuni valori rispetto a diversi scenari di trattamento.

		Riuso	Riciclo Open loop	Riciclo Close loop	Combustione	Compostaggio	Discarica
Tipologia di rifiuto	Unità di misura	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	t	/	/	/	/	/	5,918
Asfalto	t	/	0,989	0,989	/	/	1,239
Calcestruzzo	t	/	0,989	0,989	/	/	1,239
Cartingesso	t	/	/	21,294	/	/	71,950
Gomma	t	/	/	21,294	/	/	/
Isolanti	t	/	/	0,989	/	/	1,239
Legno	t	/	/	21,280	21,280	8,911	828,014
Mattoni/Laterizi	t	/	0,989	/	/	/	1,239
Metalli	t	/	/	0,989	/	/	1,264
Oli minerali	t	/	/	21,294	21,294	/	/
Terreni	t	/	/	0,989	/	/	17,583
Vetro	t	/	21,294	21,294	21,294	/	8,902

Tab.24 Fattori di emissione specifica di rifiuti da costruzione secondo il database BEIS (elaborazione da parte dell'autore su fonte BEIS [52])

N.B. I valori desunti, vengono presi in considerazione per la rendicontazione della EC all'interno delle fasi C3-C4, dato che all'interno del database di BEIS i valori proposti considerano al loro interno un' emissione prodotta dalla fase C2 stimata per distanze inferiori di 10 km, distanza mediamente molto complessa da ottenere.

Al fine di individuare, quindi, il valore di EC associabile alle fasi C3 e C4 è possibile adoperare una metodologia comune sia per il metodo base che per il metodo avanzato, la quale **differirà** come sempre in virtù del grado di dettaglio e della certezza della quantità, difficilmente garantita dai documenti impiegati all'interno del metodo di base.

Inoltre, si ricorda che all'interno del metodo avanzato i valori di EC_{C3+C4} possono essere desunti, qualora impiegate, tramite consultazione di specifiche dichiarazioni ambientali EPD.

Nonostante ciò, in generale la metodologia presa in esame per la determinazione della EC_{C3+C4} propone **tre** distinti *steps*.

STEP 1 *Quantificazione del rifiuto prodotto e associazione del tasso di recupero*

In questa fase, il progettista identifica i **singoli** quantitativi di rifiuto appartenenti alle diverse categorie riscontrabili sul sito di progetto.

A tali materiali, poi, sarà associato una percentuale di recupero; altresì è possibile procedere tramite il calcolo dei due scenari di recupero presentati sopra ovvero quello del

$$[15] \text{ Scen. } 100\% \text{ jesimo rif.} = \text{jesimo rif. [kg]}^* \\ * 1 \text{ [kg]}$$

$$[15a] \text{ Scen. } 70 - 30\% \text{ jesimo rif.} = \text{jesimo rif. [kg]}^* \\ * 0,7 \text{ [kg]}$$

$$[15b] \text{ Scen. } 70 - 30\% \text{ jesimo rif.} = \text{jesimo rif. [kg]}^* \\ * 0,3 \text{ [kg]}$$

100% e del 70-30%.

STEP 2 *Calcolo dell'EC in relazione allo scenario di smaltimento o recupero*

All'interno di questo *step*, impiegando dei valori tabellari come quello sopra proposto dalla BEIS, è possibile **associare** al quantitativo di rifiuti prodotti un fattore specifico di emissione che dovrà fare capo alla **modalità** scelta di trattamento dei rifiuti (riciclaggio aperto, riciclaggio chiuso o deposito in discarica)

$$[16] \text{ } ECC_{3+C4} \text{ } 100\% \text{ jesimo rifiuto} = \\ 100\% \text{ kg jesimo rifiuto}^* \\ * f \text{ emissione specifica discarica} \\ \text{[kgCO}_2\text{eq]}$$

$$[17] \text{ } ECC_{3+C4} \text{ } 70 - 30\% \text{ jesimo rifiuto} = \\ [70\% \text{ kg jesimo rifiuto}^* \\ * f \text{ emissione specifica riciclo}] + \\ + [30\% \text{ kg jesimo rifiuto}^* \\ * f \text{ emissione specifica riciclo}] \\ \text{[kgCO}_2\text{eq]}$$

STEP 3 *Calcolo della EC_{C3+C4}*

All'interno di questo punto si agglieranno i valori singoli precedentemente desunti al fine di poter ottenere il valore **complessivo** di EC riferito alle fasi C3 e C4.

6.7. OLTRE IL CICLO DI VITA (D)

La fase "D" si riferisce a tutte quelle pratiche circolari che il progettista può prevedere al termine della vita utile del manufatto edilizio da lui progettato, valutandone la loro efficacia in termini di benefici o di ulteriori carichi al sistema ambientale. In questa fase, infatti, sono individuati e valutati i possibili **benefici** che un materiale dismesso può ottenere a seguito di azioni volte ad un riciclo o ad un recupero, sia in termini materici che in termini energetici del componente (ovvero recuperando la cosiddetta componente energetica di *feedstock*).

Ciò che è fondamentale sottolineare è il carattere predittivo e generico che caratterizza questo processo di contabilizzazione. Difatti, la valutazione della fase D avviene al di là della fine dello scenario temporale di riferimento, è impossibile che questa non sia afflitta da **errore** in merito alle percentuali di riciclaggio medio e circa le tecnologie di recupero e riciclaggio dei materiali, che nel corso degli anni (se comparate con l'anno 0 della stima) potrebbero subire delle variazioni e delle migliorie (GBC Italia 2022d, pp. 84-85).

Sotto il punto di vista metodologico, a fronte di tutto ciò che fin qui si è detto, è naturale aspettarsi che al progettista sia richiesta la contabilizzazione della EC, la quale viene valutata come **differenza** in termini di CO_{2eq} tra il processo di recupero del materiale e il processo di realizzazione dello stesso materiale, utilizzando **esclusivamente** materie prime o secondo le odierne tecniche di produzione. In altre parole, al valutatore spetta il compito di effettuare un bilancio di EC risparmiata a seguito di approcci circolari, dovuto al

rimpiego delle materie prime seconde (recuperate dopo la dismissione del manufatto analizzato, fasi C3 e C4) nella produzione di nuovi materiali o componenti.

Tradotto in formula:

$$[18] EC_D = EC_{A1-A3}Mat_{jrc} - EC_{A1-A3}Mat_{BAU} \text{ [kgCO}_{2eq}]$$

Dove per $EC_{A1-A3}Mat_{jrc}$ si intende l'*Embodied Carbon* associata alle fasi A1-A3 relativa ad un processo di produzione che vede l'impiego di materia prima seconda (proveniente da processi di riciclo), mentre per $EC_{A1-A3}Mat_{BAU}$, il valore di kgCO_{2eq} relativo alla produzione di un materiale secondo le tecniche odierne, quindi di *Business as Usual* (BAU).

Nel dettaglio per l'individuazione dell' $EC_{A1-A3}Mat_{jrc}$ si specifica che:

$$[19] EC_{A1-A3}Mat_{jrc} = \sum_{j=1}^n (1-R_j) * EC_{Pro-j} + (R_j * EC_{Rec-j}) \text{ [kgCO}_{2eq}]$$

In cui R_j è il quantitativo di materiale riciclato impiegato nella produzione del j-esimo materiale, per E_{Pro-j} si intende l'EC relativa all'impiego di sola materia prima per il processo di produzione, mentre E_{rec-j} si intende il quantitativo di EC dovuta ad un processo di produzione del j-esimo materiale o componente che vede l'impiego di materia prima seconda.

Si tiene a specificare, inoltre, che il contenuto R_j non è un valore prestabilito, poiché questo potrebbe **variare** a seconda della geografia o della natura del materiale stesso. A tal proposito, il valutatore può corredare lo studio fornendo diversi tassi di recupero del

materiale provenienti da diversi comprovati e certificati scenari di trattamento della materia in esame.

6.7.1. BENEFICI PROVENIENTI DALLA FASE D SECONDO UN APPROCCIO DI CIRCULAR ECONOMY

Come visto fin qui, all'interno di una valutazione circa l'EC di un manufatto architettonico è possibile anche valutare e determinare il grado di **circularità** dell'intervento proposto.

Questo, viene affrontato nel dettaglio all'interno della fase D dove, attraverso la selezione di due o più scenari di valutazione, si rendiconta l'EC risparmiata in seguito all'impiego di una determinata pratica circolare.

La valutazione in tal senso, che si ricorda essere un momento distinto dalla rendicontazione della WLC, si completa con delle operazioni definite di *off-setting* ovvero iniziative che si prefiggono l'obiettivo di **compensare** una quota delle emissioni prodotte dalla realizzazione del manufatto.

Nel dettaglio rientrano all'interno della categoria di operazione di *off-setting*: la realizzazione di impianti di produzione di energia da fonte rinnovabile, gli interventi di forestazione o gli investimenti in impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (RICS 2023, pp. 68-69).

I benefici di tali operazioni vengono trattati specificamente nel BOX 1.

6.8. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON DI IMPIANTI E SERVIZI

All'interno di questa sezione si intende svolgere un'analisi riguardante l'EC afferente ad una categoria specifica, ovvero quella degli *Impianti e servizi*. Con tale categoria si intendono tutti gli impianti riguardanti la climatizzazione, la ventilazione o la produzione di energia rinnovabile, o come il mondo anglosassone sintetizza, gli impianti MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*).

L'importanza di individuare in maniera concreta un valore di EC per il MEP risiede sia nella volontà di fornire un valore **finale** di WLC (che sia in grado di tenere in conto tutti gli *input* e gli *output* di un manufatto architettonico), sia per avere una qualità del dato che possa essere in grado di stabilire l'**effettivo** ammontare delle emissioni di anidride carbonica correlate all'utilizzo di determinati impianti.

Infatti, come testimoniato dal *report* redatto nel 2020 dal *Low Energy Transformation Initiative* (LETI), l'impatto che il MEP può avere in termini di emissione per manufatti *ex-novo* oscilla tra il 2-27% e intorno al 75% per le ristrutturazioni sull'esistente (LETI 2020, p. 63).

Tali valori possono subire questa oscillazione a causa delle tecnologie impiegate per i servizi o, ad esempio, dal tipo di gas refrigerante utilizzato dalle macchine del MEP.

La metodologia proposta, perciò, segue in maniera pedissequa quanto già introdotto nel calcolo dell'EC del manufatto edilizio nei suoi aspetti prettamente architettonici. Per questo

motivo si procede con una suddivisione della metodologia secondo un metodo base o un metodo avanzato, differenziandosi a seconda della fase in cui si svolge la contabilizzazione o della natura dei dati di *input*.

Inoltre, attraverso questa metodologia le emissioni che saranno contabilizzate a seguito dell'utilizzo di sistemi MEP partiranno dalla fase A1 fino alla fase C4, passando per la fase B1-B5 che, come già visto, indica la fase di uso. Le emissioni che però saranno contabilizzate all'interno di questa trattazione **non** saranno riferibili al fabbisogno energetico (poiché *Operational Carbon*, già trattata precedentemente), bensì riguarderanno ad esempio, i macchinari impiegati per la fase di manutenzione, riparazione e sostituzione.

Tornando alle metodologie proposte, entrambe vedranno per il loro calcolo l'utilizzo di un *buffer factor* ovvero di un **fattore correttivo**, al fine di contabilizzare con un margine di errore le emissioni interessate.

Tali emissioni, poi, nella loro computazione finale saranno normalizzate secondo l'unità funzionale impiegata al fine di poter, per aggregazione, contabilizzare il valore di WLC. Qualsiasi sia la natura della metodologia (base o avanzata), al valutatore sarà inoltre richiesto di stimare sia la vita utile in anni del sistema MEP sia di valutare la tipologia e i kg di refrigerante utilizzato per il funzionamento dello stesso sistema (GBC Italia 2022d, pp. 90-99).

Di seguito si tratteranno i due metodi menzionati sopra.

6.8.1. VALUTAZIONE DELL'EMBODIED CARBON ATTRAVERSO IL METODO DI BASE

La rendicontazione delle emissioni tramite il metodo base è da prendere in considerazione all'interno delle prime fasi del progetto. Questa prima rendicontazione inoltre potrà essere svolta o attraverso **dati generici** contenuti in banche dati (EPD, ÖKOBAUDAT o ad esempio BRE) o attraverso un approccio che prenda in considerazione i **materiali principali**.

Questa seconda metodologia permette al valutatore o di calcolare l'EC dei singoli Materiali chiave noti (*key materials*) che compongono un sistema MEP tramite utilizzo di specifiche banche dati o, qualora non fossero noti, di richiedere al valutatore di decostruire il sistema oggetto d'analisi, per poi effettuare un bilancio di massa che permetterà di stimare l'EC del MEP.

Di seguito, si tratteranno le due metodologie di base previste, ovvero la metodologia dei *General media data* (Dati medi generici) la quale consta di **cinque** principali *steps* e la metodologia *Key materials* la quale consta di **sei steps** (GBC Italia 2022d, pp. 91).

STEP 1 *Calcolo dell'EC dei materiali che costituiscono i MEP*

In conformità a quanto descritto nella TM65:2021 del CIBSE, come primo passo è richiesto al valutatore di identificare in termini quantitativi i materiali che sono costituenti del sistema MEP (CIBSE 2021).

Ai fini della rendicontazione dell'*Embodied Carbon*, i materiali individuati dovranno essere

almeno il 95% del totale mentre il restante 5% si potrà desumere di acciaio. A tali quantità poi corrisponderà (tramite scelta di apposite banche dati) un **valore medio aggregato**, che permetterà la successiva rendicontazione (da qui la definizione di *metodo dei dati medi generici*). Qualora invece si fosse sprovvisti di dati aggregati, si può procedere con il metodo *key materials*, andando a prendere in considerazione i valori di EC associati alla fase A1 dei materiali che compongono il sistema MEP e poi per **sommatoria** restituire un valore complessivo di EC.

STEP 2 *Calcolo dell'EC durante le fasi B2-B3-B4*

All'interno di questo *step* si procede con il calcolo dell'EC delle fasi di manutenzione (B2), riparazione (B3) e sostituzione (B4) attraverso due approcci: il primo, tramite informazioni desunte da scheda tecnica, che permetterà di individuare quali componenti e materiali saranno oggetto, ad esempio, di sostituzione nel corso dello scenario temporale di riferimento, associando a queste operazioni i valori corrispettivi di *Embodied Carbon*; il secondo invece prevede, qualora si fosse sprovvisti di dati, di calcolare l'*Embodied Carbon* associata

alla fase di uso, **umentando** del 10% il valore desunto all'interno del primo *step*.

Inoltre, si specifica che, se si è proceduto tramite la modalità *dati medi generici*, tale aumento deve essere comprensivo della EC delle fasi A1-A3, mentre per la seconda modalità l'aumento è **esclusivamente** riguardante la fase A1.

STEP 3 *(esclusivo per il metodo "key materials")*

Moltiplicazione del valore di EC per il fattore di scala.

All'interno di questo *step* si richiama il fattore di scala, introdotto all'interno sempre del TM65. Tale fattore altro non è che un fattore correttivo, compreso tra 1,3 e 1,6 a seconda del grado di **complessità** del sistema MEP (tab. 25) al fine di poter contabilizzare i valori di EC delle fasi A2, A3, C2, C3, C4 (Fig. 26b).

STEP 4 *Moltiplicazione del valore di EC per il fattore buffer*

All'interno di questo, per entrambi i metodi, si moltiplica il valore desunto di EC per un **fattore** pari ad 1,3 al fine di procedere, in via cautelativa, alla contabilizzazione dell'indicatore (Tab. 25).

Complessità	Esempio	Fattore di scala
Basso	Tubi, cavi, condotti, calvole, dispositivi di allarme antincendio, prese elettriche, ecc.	1,3
Medio	Pompe, corpi illuminanti, radiatori, pannelli di controllo, dispositivi di regolazione dell'illuminazione, sensori, accumulatori termici, ecc.	1,4
Alto	Unità di trattamento dell'aria, pompe di calore, caldaie, unità di interfaccia termica, refrigeratori, generatori, MVHR, quadri elettrici, UPS	1,6

Tab.25 *Variazione del fattore di scala in risposta alla complessità del MEP (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])*

STEP 5 Calcolo dell'EC dovuto alla perdita del gas refrigerante

In questa fase, viene contabilizzata l'emissione conseguente ad un utilizzo da parte di alcuni sistemi MEP di gas refrigerante. Nel dettaglio, verrà presa in considerazione la **perdita** di questo gas durante le fasi di Uso (B1) e di Demolizione (C1).

Di seguito si riporta il calcolo espresso all'interno del TM65:2021 (CIBSE 2021).

Per il calcolo della fase B1, si prende in considerazione il quantitativo (in kg) di gas refrigerante e la tipologia dello stesso, moltiplicandolo per il *tasso di perdita annuale* (in %). Tale valore viene poi moltiplicato per il

corrispettivo valore di *GWP* (in kgCO_{2eq}) e allo scenario temporale di riferimento del sistema MEP.

Per il calcolo della fase C1, invece, si effettua la stessa procedura, escludendo però dalla moltiplicazione il numero di anni della vita utile del MEP, poiché essendo una fase di demolizione la rendicontazione sarà riferita solo all'**ultimo** anno del manufatto.

STEP 6 Calcolo dell'EC totale

In questo ultimo passaggio, invece, si individua il valore complessivo di EC del sistema tramite **sommatoria** dei singoli valori individuati precedentemente (Fig. 26a).

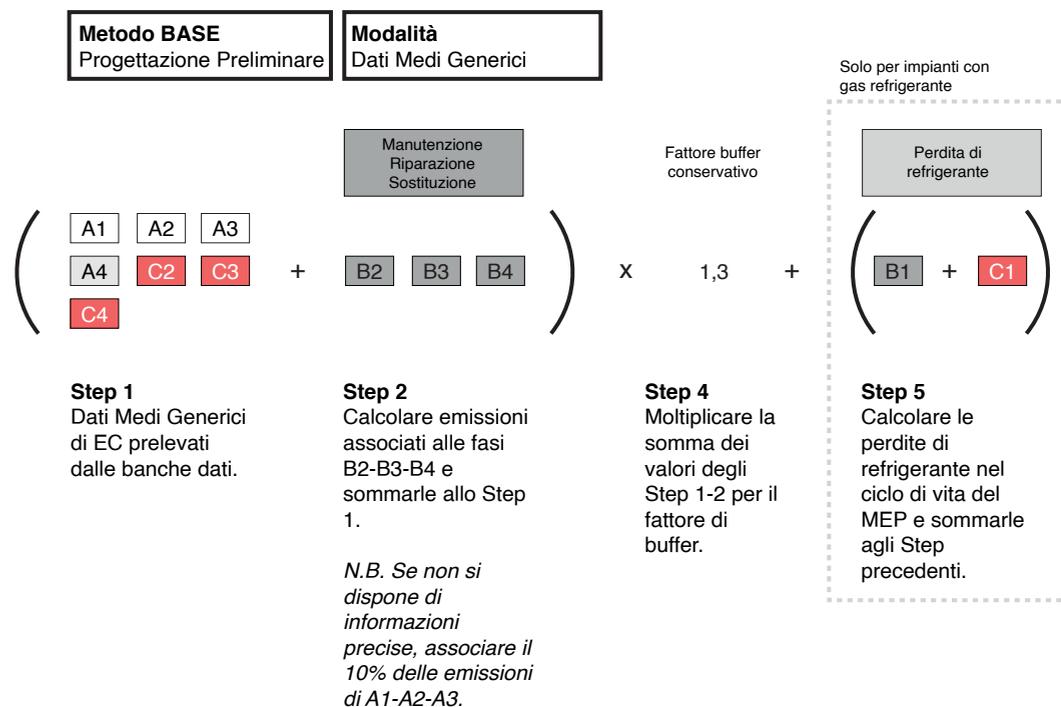


Fig.26a Quadro sinottico secondo il metodo base: modalità Dati medi generici (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

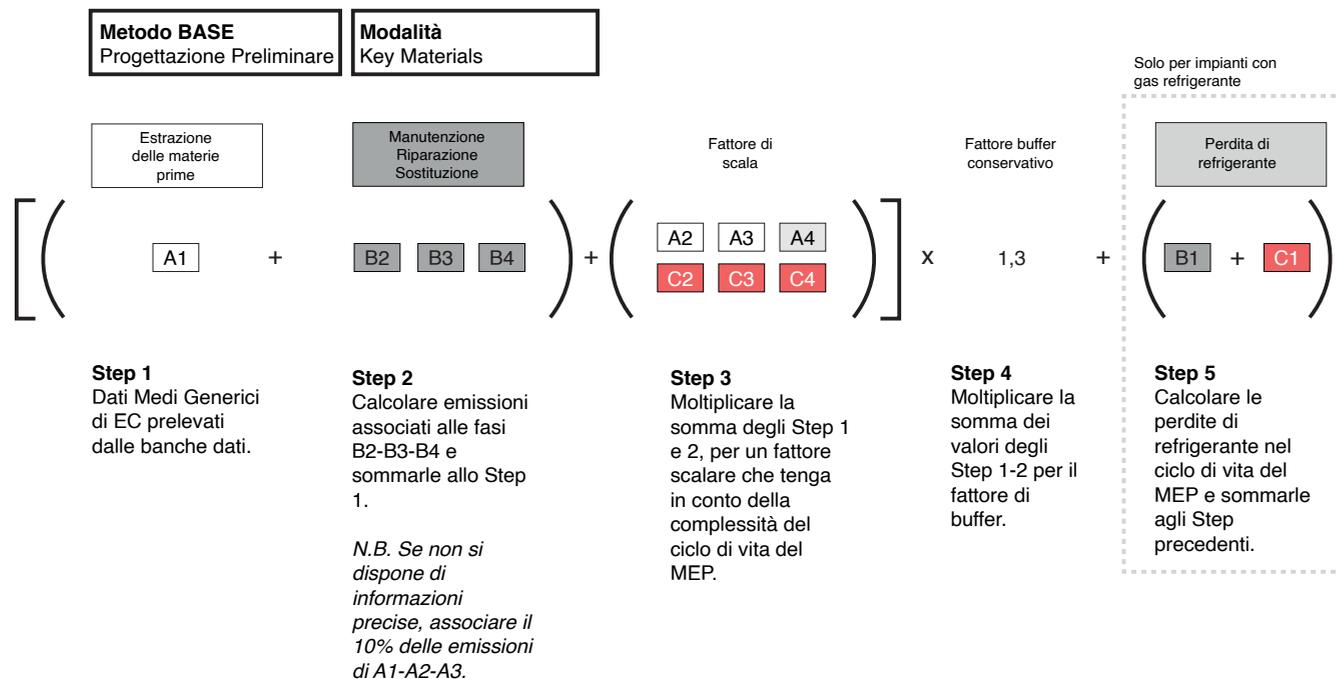


Fig.26b Quadro sinottico secondo il metodo base: modalità Key Materials (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

6.8.2. VALUTAZIONE DELL'EMBODIED CARBON ATTRAVERSO IL METODO AVANZATO

Come descritto nelle fasi precedenti, il metodo avanzato è da impiegarsi qualora fossimo all'interno di una progettazione **esecutiva** o se vi fosse il coinvolgimento di un'impresa esecutrice per il sistema impiantistico o nel caso in cui il valutatore disponesse di certificazioni tecnico-ambientali (EPD) contenenti valori di dettaglio circa i materiali impiegati (GBC Italia 2022d, pp. 95).

La disponibilità effettiva di EPD, quindi, caratterizza ulteriormente il metodo avanzato

secondo **due** modalità: la prima quella dei Dati verificati (*verified data*), ovvero la possibilità di impiego dei dati contenuti all'interno delle certificazioni EPD, verificandone la veridicità e verificando anche i valori relativi alla perdita di gas refrigerante nelle fasi B1 e C1; la seconda è invece quella della rendicontazione di EC tramite la modalità dei Materiali chiave ("key materials"), impiegabile nel caso in cui non si disponesse di certificazioni.

In questo caso al valutatore, assieme all'impresa esecutrice dell'impianto, è richiesta **non** solo la stima in termini di massa del MEP (secondo la regola 95-5% descritta nel paragrafo precedente), ma anche la vita utile in

anni del sistema, il tipo di gas refrigerante impiegato, l'energia utilizzata per la produzione del MEP; infine sono richieste anche informazioni di tipo geografico circa il luogo dell'assemblaggio finale.

Di seguito si tratterà la metodologia avanzata per la valutazione dell'*Embodied Carbon*, la quale conterà di **sei** step per la modalità "verified data" e di sette per la modalità "key materials".

STEP 1 *Calcolo dell'EC nella fase A*

In questo primo step, si tende al calcolo dell'*Embodied Carbon* per le tre fasi della produzione, quindi la fase dell'estrazione delle materie prime (A1), la fase del trasporto al sito di produzione (A2) ed infine quella della trasformazione in prodotti finiti e semilavorati (A3). Qualora disponessimo di certificazioni ambientali come l'EPD (quindi nel caso in cui fossimo all'interno della modalità "verified data"), tali valori potrebbero essere desunti al loro interno.

All'interno della modalità "key materials" invece, si procede come segue.

Innanzitutto, come primo *sub-step* si contabilizza il peso complessivo del sistema MEP (si ricorda di adoperare l'approccio 95-5% all'interno del quale dopo aver selezionato almeno il 95% dei materiali che compongono il sistema si presume il restante 5% in acciaio). Dopo aver contabilizzato il peso di **ogni** materiale, questo, viene moltiplicato per il corrispettivo valore di EC riscontrabile all'interno di apposite banche dati, al fine di ottenere il valore di EC (kgCO_{2eq}) corrispondente alla fase A1. In un secondo momento, invece, si contabilizzano le

emissioni afferenti alla fase di trasporto.

Questo apporto, qualora fossero noti dei dati circa la metodologia del mezzo impiegato e le distanze da percorrere, può essere desunto tramite la stessa formula presentata all'inizio del capitolo per la fase A2. Se, invece, non disponessimo di tali informazioni, si potrebbe procedere all'ipotesi di queste basandosi sulla **complessità** e sulla **reperibilità** dei materiali selezionati.

L'ultimo *sub-step* è quello riguardante la contabilizzazione dell'EC, all'interno della fase di trasformazione dei materiali. All'interno di questo step, al valutatore è richiesta la rendicontazione delle emissioni relative al **consumo energetico** annuale richiesto per la produzione del sistema MEP, andando quindi a decifrare i vettori energetici indicati per poi moltiplicarli per un fattore di emissione specifica. Inoltre, per questa fase si considera, sempre per motivi **cautelativi**, dati la complessità della stima e del sistema da valutare, l'impiego di specifici "buffer factors" (ovvero dei fattori di scala) riassunti nella tabella sottostante Tab. 27.

Complessità	Esempio	Fattore di scala
Basso	Tubi, cavi, condotti, valvole, dispositivi di allarme antincendio, prese elettriche, ecc.	x1
Medio	Pompe, corpi illuminanti, radiatori, pannelli di controllo, dispositivi di regolazione dell'illuminazione, sensori, accumulatori termici, ecc.	x2
Alto	Unità di trattamento dell'aria, pompe di calore, caldaie, unità di interfaccia termica, refrigeratori, generatori, MVHR, quadri elettrici, UPS	x4

Tab.27 Fattore di moltiplicazione dell'EC in funzione della complessità del MEP (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

STEP 2 *Calcolo dell'EC della fase A4*

All'interno di questa fase si effettua la rendicontazione delle emissioni legate al trasporto in cantiere (A4) dei materiali presi in esame applicando la **stessa** metodologia proposta sia nel primo *step* che nel paragrafo corrispondente alla fase A4 visto all'inizio del capitolo.

STEP 3 *Calcolo dell'EC della fase B (Uso)*

In questo passaggio, si determina l'EC associata alla fase di manutenzione (B2), riparazione (B3) e sostituzione (B4). Nel caso della modalità *"verified data"*, la contabilizzazione può avvenire semplicemente desumendo i valori presenti all'interno della certificazione; al contrario, nel caso *"key materials"* i valori dei singoli materiali che compongono il MEP possono essere desunti attraverso la formula presentata nel metodo base al secondo *step*.

STEP 4 *Calcolo dell'EC nella fase C (Fine Vita)*

In questo *step* si procede alla contabilizzazione delle emissioni relative a tutte le fasi che caratterizzano il fine vita, ovvero le fasi di demolizione (C1), di trasporto al sito di trattamento dei rifiuti (C2), al trattamento degli stessi (C3) ed infine al loro smaltimento (C4).

Si ricorda che, qualora disponessimo di certificazioni ambientali (*"verified data"*) i suddetti dati potranno essere direttamente desunti da lì. Nel caso dei *"key materials"*, invece, si procederà come segue. Innanzitutto, si vanno a valutare quelli che sono i valori relativi ai processi di **demolizione** (in via del tutto simile a quanto già descritto per la EC della fase A5), ricordando che i valori di emissione relativi a questa fase, essendo minimi, possono essere

anche esclusi dalla contabilizzazione.

In secondo luogo, si procede con il calcolo del **trasporto** al sito di trattamento dei rifiuti, andando ad associare il relativo valore di EC secondo la procedura già descritta all'interno del riguardante la fase C2.

Infine, si passa al calcolo delle fasi in merito al **fine vita**, ovvero le fasi C3 e C4, le quali rappresentano il momento effettivamente più complesso di questa fase, del resto si era detto lo stesso per la fase C4 del manufatto architettonico.

Nel dettaglio, per la rendicontazione in questione, al valutatore è richiesto di ipotizzare e contemporaneamente di rendicontare **diversi** scenari di smaltimento, che, a differenza di quelli presi in considerazione per il manufatto architettonico, non sono più relativi esclusivamente allo scenario *"100%"* o *"70-30%"*, bensì sono valutati a seguito della consultazione di diverse tabelle di riferimento, tra le quali quella messa a disposizione dalla TM65:2021, riportata di seguito.

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%

Tab.28 Scenari di smaltimento e percentuali associate (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

STEP 5 (esclusiva per modalità “key materials”)

Moltiplicazione del valore di EC per il fattore buffer

In questo step, per motivi cautelativi, si propone di aumentare del 30% il valore riscontrato di EC moltiplicando lo stesso per un valore “buffer”, ovviamente pari a 1,3 (Fig. 30b).

STEP 6 Calcolo dell’EC dovuta alla perdita di gas refrigerante

All’interno di questa fase, si prendono in considerazione le emissioni correlate all’impiego (B1) e alla perdita (C1) di gas refrigerante, ovvero operazioni che producono emissioni di anidride carbonica equivalente. Al fine di poter stimare le percentuali di perdita del gas all’interno della modalità “key materials”, si propone l’utilizzo di apposite tabelle proposte dalla TM64:2020 (CIBSE 2020), all’interno delle quali vengono presi in considerazione diversi **tassi** di perdita

annuali e di fine vita correlati a diversi tipi di impianti impiegati (che essi siano pompe di calore o HVAC quindi unità per il riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell’aria) (Tab. 29).

A questo punto i dati desunti possono essere moltiplicati per il numero di anni di vita utile della componente presa in considerazione, per il fattore potenziale di riscaldamento globale (kgCO_{2eq}) e infine per il quantitativo in kg del refrigerante richiesto dalla componente.

Così facendo, si può desumere il valore di EC relativa alla fase B1 e C1 del **gas impiegato** per poi sommarlo ai valori di EC degli altri elementi costituenti il MEP.

STEP 7 Calcolo dell’EC totale del MEP

Infine, si intende il calcolo dell’EC totale come la **sommatoria** di tutti i valori individuati nei sei steps precedenti (Fig. 30a).

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%

Tab.29 Tassi di perdita del gas refrigerante (elaborazione da parte dell’autore su fonte GBCItalia [19])

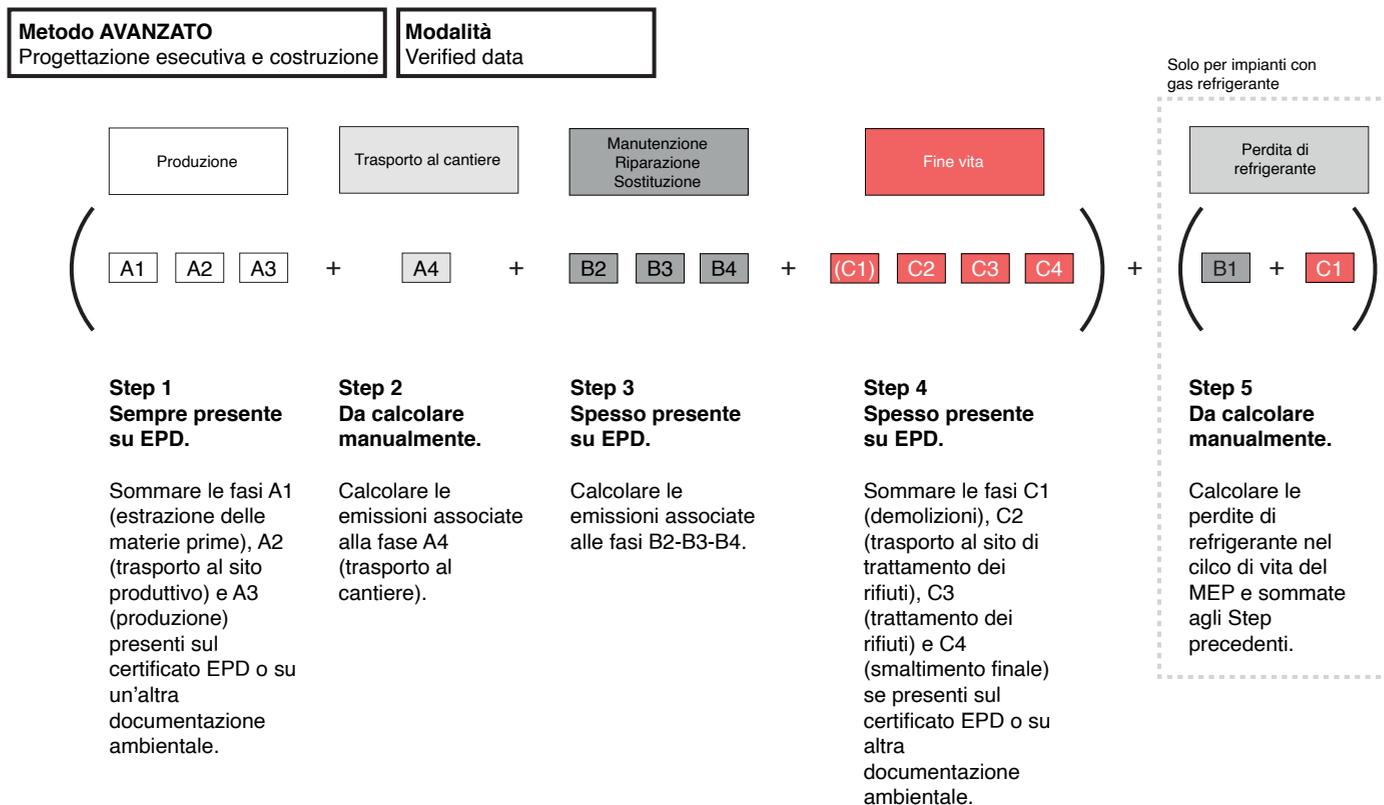


Fig.30a Quadro sinottico secondo il metodo avanzato: modalità Verified Data (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [18])

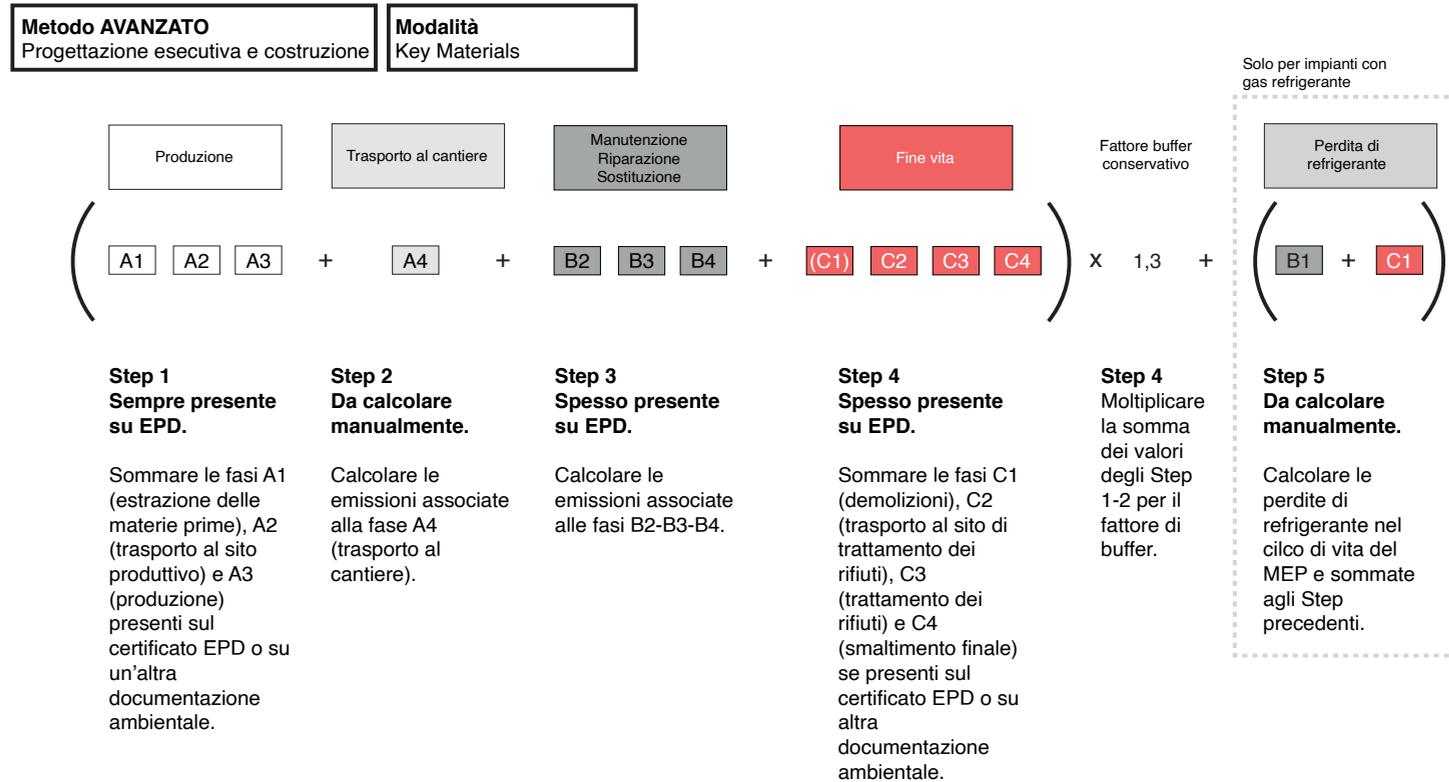


Fig.30b Quadro sinottico secondo il metodo avanzato: modalità Key materials (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

6.9. DETERMINAZIONE DELLA WHOLE LIFE CARBON

Si conclude il capitolo 3 con la modalità di calcolo attraverso cui è possibile risalire al valore finale di *Whole Life Carbon*, ovvero della WLC. Il suddetto bilancio, si ricorda, che intende in maniera olistica le emissioni di CO_{2eq}, ovvero **considera** gli impatti provenienti dalla fase A1 (estrazione) alla fase C4 (smaltimento), secondo un approccio *Cradle to Grave*, al fine di valutare non solo i valori di EC iniziali, bensì anche i valori, talvolta negativi, determinati dall'uso di determinati materiali o componenti.

Matematicamente, quindi, la WLC si traduce come segue:

$$[20] \text{ WLC} = \sum_{j=1}^n [EC_{A1-A3} + (-CS_{A1-A3}) + EC_{A4} + EC_{A5}] + [EC_{B1} + EC_{B2B3} + EC_{B4} + EC_{B5} + OC_{B6+B7}] + [EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4} + (\pm CS_{C3+C4}) + (-CU_{C3+C4})] \text{ [kgCO}_{2\text{eq}}]$$

Dove si individuano tre diverse famiglie di indicatore, ovvero: EC (dalla fase A1 alla fase C4) quindi l'*Embodied Carbon*, la fase CS (da C3 a C4) per la contabilizzazione della "*Carbon Sequestration*" di materiali e prodotti lignei (i quali sono stati approfonditi all'interno del BOX 1) e infine la CU, ossia la contabilizzazione del fenomeno della carbonatazione all'interno delle fasi C3 e C4.

Ciò che risulta di cruciale importanza ricordare è che all'interno della fase d'uso (B1), il conteggio non prevede solo la rendicontazione dei valori di *Embodied Carbon*, bensì anche la

valutazione di impatti **positivi** derivati dall'uso di elementi a base cemento o legno o di elementi di finitura vegetale (tetti verdi ad esempio).

In altre parole, è **fondamentale** tenere in considerazione all'interno della fase EC_{B1} un compendio dei risultati di *Embodied Carbon*, di *Carbon Sequestration* e di *Carbon Uptake* ottenuti dall'uso di determinati elementi.

Inoltre, si noti che i valori finali di WLC, ottenuti seguendo la metodologia prevista dovrebbero essere almeno due, derivanti dai due scenari di smaltimento previsti per le fasi C3 e C4, che, a seconda delle **tecniche** di smaltimento ipotizzate, potrebbero avere anche valore negativo (ad esempio nel caso di un recupero totale delle componenti a base legno).

Infine, si prende anche in considerazione il contributo apportato dai sistemi MEP calcolato a parte al fine di agevolare le azioni di calcolo per poi, attraverso azioni di **normalizzazione** delle unità di misura di riferimento, sommarle in un secondo momento.

Ancora una volta, tradotto matematicamente:

$$[21] \text{ WLC t. (scen. 1)} = \text{WLC (scen. 1)} + \text{WLC}_{\text{MEP}} \text{ [kgCO}_{2\text{eq}}]$$

$$[21a] \text{ WLC t. (scen. 2)} = \text{WLC (scen. 2)} + \text{WLC}_{\text{MEP}} \text{ [kgCO}_{2\text{eq}}]$$

Attraverso questo ultimo calcolo, il valutatore sarà in grado di "consegnare" un valore dettagliato e soppesato circa le emissioni di CO_{2eq} riscontrate durante l'intero ciclo di vita utile di un manufatto architettonico realizzato.

7. BOX 1- APPROFONDIMENTO SUL LEGNO

All'interno di questo BOX 1 si procederà con una trattazione sulle caratteristiche che investono i materiali a base legno, al fine di restituire le modalità di contabilizzazione dell'anidride carbonica e l'influenza di questa sulla valutazione WLC cercando di restituire un lavoro che sia in grado di tenere in conto anche dei progressi tecnologici degli ultimi anni sui materiali a base lignea.

Infatti, grazie agli sviluppi del legno lamellare, oggi risulta possibile alternare al largo uso di acciaio e cemento l'impiego di legname, offrendo alcuni vantaggi come: la riduzione delle emissioni nella produzione delle componenti, lo stoccaggio di CO₂eq all'interno dell'edificio e il riciclaggio fine vita delle componenti in legno lamellare pari al 55%.

*Inoltre, adottare soluzioni in legno (come descritto all'interno del documento *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future* (GlobalABC, UNEP 2023)) permetterebbe una riduzione delle emissioni globali di CO₂eq di circa il 14-31% e dell'uso globale di combustibili fossili del 12-19% (GlobalABC; UNEP 2023, pp. 28-29).*

Ciononostante, l'utilizzo di soluzioni in legno è subordinato alle specifiche caratteristiche geografiche del sito di costruzione e del manufatto edilizio.

Il BOX 1, intende quindi esaminare le metodologie impiegabili per il conteggio delle emissioni dei materiali a base lignea, evidenziando le differenze con quanto esposto precedentemente.

7.1. CARBON SEQUESTRATION- PRODUZIONE (A1-A3)

Per quanto riguarda i materiali a base legno, il discorso in merito alle sue fasi di produzione cambia profondamente, dato il contributo in questa fase di quello che viene definito “carbonio biogenico” ovvero la quota di carbonio **sequestrato**, quindi stoccato, dalla pianta durante il suo processo di fotosintesi. A supporto della contabilizzazione di questa componente, si rimanda alla normativa specifica UNI EN 15804:2019, all’interno della quale viene esposta la procedura per il calcolo del carbonio biogenico, il cui contributo rimane **costante** all’interno delle successive fasi del ciclo di vita (A1-A5, B1-B7 e C1-C4), a differenza del contributo dato dalle componenti di origine fossile che, come visto precedentemente, subiscono delle variazioni considerevoli durante la loro fase operativa (GBC Italia 2022d, p. 45).

La figura 31, a pagina seguente, restituisce quanto appena descritto in forma grafica.

La quota di carbonio sequestrato, se utilizzate apposite EPD, viene indicata all’interno delle specifiche del materiale, ma, qualora fossimo all’interno di un metodo “base”, la stima del carbonio biogenico CS_{A1-A3} , **convertito** naturalmente in anidride carbonica, si calcolerebbe come segue in accordo con quanto esposto nella normativa UNI EN 16449:2014 (UNI 2014):

$$[22] CS_{A1-A3} = \frac{44}{12} * cf * \frac{1}{1 + \frac{\omega}{100}} \left[\frac{\text{kgCO2eq}}{\text{kg di prodotto}} \right]$$

Dove il rapporto 44/12 indica il rapporto tra la massa atomica dell’anidride carbonica e del carbonio, per cf si intende la frazione di carbonio nella biomassa secca legnosa (di solito pari a 0,5) e infine ω fa riferimento al contenuto di umidità all’interno dell’elemento ligneo (di solito pari a 12%).

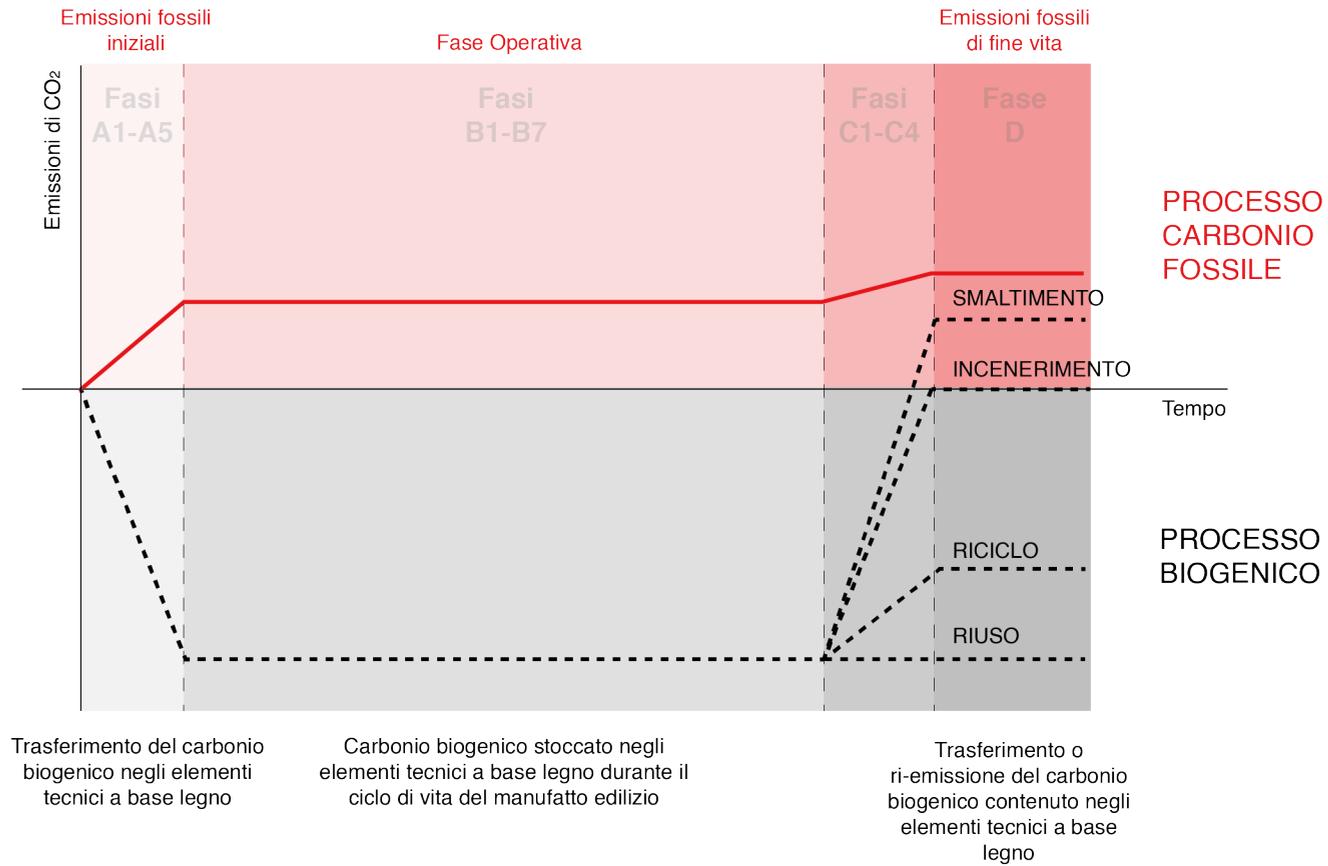


Fig.31 Andamento del carbonio biogenico e del carbonio fossile di un generico prodotto (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

7.2. CARBON SEQUESTRATION - FINE VITA (C3-C4)

Per quanto concerne invece il contributo degli elementi a base lignea all'interno delle fasi C3 e C4, a questi corrisponde un valore di assorbimento del carbonio che (come visto all'interno della fase A1-A3) avviene in maniera naturale, a causa dei processi di sintesi clorofilliana.

Questo valore, definito "*Carbon Sequestration*" (CS) viene studiato all'interno delle fasi trattamento e smaltimento, al fine di definire le modalità di gestione del credito di CO₂ dei prodotti a base legno al termine del loro ciclo di vita utile (CS_{C3C4}). Riportando quanto descritto dalla norma EN16485:2011, questi prodotti, infatti, potranno o **riemettere** in atmosfera il quantitativo di CO₂ assorbita, ovvero il quantitativo individuato all'interno delle fasi A1-A3 (attraverso processi di degradazione anaerobica o attraverso combustione del prodotto) oppure, come secondo scenario, la possibilità di vedere un **trasferimento** della CS_{A1A3} all'interno della fase CS_{C3C4}.

In altre parole, in questo secondo scenario si considera un valore **negativo** di contributo alla CO₂ emessa, dovuta ad un riutilizzo immediato dell'elemento.

Nel caso in cui, fossimo invece in presenza di uno scenario di fine vita che conduca l'elemento ad azione di riciclo, dovrà essere conteggiata dal progettista una quota addizionale di emissioni di CO₂, poiché conseguente al processo stesso di riciclo del materiale (ad esempio nel caso in cui una componente lignea seguisse un processo di frantumazione per la realizzazione di pannelli

truciolati, vi sarà una quota addizionale di emissioni dovuta ai processi di trasformazione del materiale).

Per una sintetica esplicitazione di quanto appena detto, segue una tabella riassuntiva che permette di decifrare le operazioni da svolgere qualora si volesse decifrare l'EC_{C3C4} di un elemento ligneo (GBC Italia 2022d, p. 80) (Tab. 32).

Scenario di smaltimento	Descrizione	EC _{C3+C4}
Riuso	Il materiale o prodotto mantiene invariato il credito acquisito. N.B. 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 la produzione di CO ₂ a causa dei processi di trasformazione del legno. N.B. 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. N.B. Il dato coincide con quello di CS _{A1-A3} ma il segno è opposto (+), quindi il bilancio complessivo sarà uguale a zero.	(-) CS _{C3+C4} = (-1)* (-) CS _{A1+A3} +0,03
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	
^B	Il valore di CO _{2eq} per le modalità di smaltimento in discarica con recupero di gas è stato prelevato dal database BEIS	
^C	Le discariche più moderne hanno impianti di cattura dei gas derivanti dalla decomposizione della frazione organica	

Tab.32 Contabilizzazione dell'EC_{B3+B4} dei rifiuti in legno o a base legno (elaborazione da parte dell'autore su fonte GBCItalia [19])

7.3. CARBON OFFSETTING- FASE DI USO (B1) E FASE OLTRE IL CICLO DI VITA (D)

Dal punto di vista teorico, la contabilizzazione della *Carbon off-setting* (COs), ottenuto tramite vegetazione, può suddividersi secondo due tipologie: la prima è quella della **forestazione**, che avviene qualora si converta in foresta un suolo a differente utilizzo odierno, la seconda invece è quella della riforestazione, che si ha nel caso in cui vengano attuate delle operazioni di **recupero** di terreni afforestati, ma attualmente degradati.

Inoltre, tali interventi possono essere ulteriormente classificati in interventi *off-site*; quindi, quando si trae beneficio in termini di

cattura di CO_{2eq} da aree esterne rispetto al sito di costruzione (così facendo però, i benefici apportati dovranno essere contabilizzati in maniera distinta all'interno della fase D), o in interventi *in-site*, ovvero quando si prevede ad esempio la realizzazione di coperture verdi nel manufatto architettonico in carico (potendo così contabilizzare i benefici all'interno della fase di Uso, B1).

Dal punto di vista pratico, invece, vi sono diversi strumenti impiegabili per la contabilizzazione dello stoccaggio di carbonio, come ad esempio dei modelli **predittivi** semplificati, i quali permettono di poter determinare l'assorbimento di carbonio da parte di una specie vegetale prendendo in

considerazione la specie stessa, il diametro del suo fusto e i suoi *coefficienti allometrici* caratteristici.

Un primo passo per il conteggio della CO_s, sia nel caso della fase B1 che della fase D, è perciò l'individuazione della massa secca; la quale viene calcolato nel modo seguente:

$$[23] M = a * D^b \text{ [kg]}$$

Dove, con *a* e *b* si intendono i coefficienti allometrici, mentre con *D* il diametro del fusto misurato ad 1,3 m di altezza.

Per quanto riguarda poi la determinazione specifica del CO_s nelle fasi B1 e D, questa viene calcolata tramite la moltiplicazione del valore di massa secca individuato, con il coefficiente 1,83 ottenuto dal rapporto tra il peso molecolare di C (carbonio) con la CO₂ (anidride carbonica) moltiplicato per il contenuto di carbonio all'interno di 1 kg di massa secca (notoriamente pari al 50%).

Tradotto in formula:

$$[24] CO_{s_{B1}} = CO_{s_D} = M * 1,83 \text{ [kgCO}_2\text{]}$$

Un secondo strumento pratico, impiegabile per l'individuazione della CO_s, è anche quello dei fogli di calcolo BENEFITS (*Valutazione dei benefici ecosistemici dell'infrastruttura* all'interno del progetto REBUS finanziato dal *Ministero Italiano delle Politiche Agricole Alimentari e Forestale*), in cui è possibile andare a determinare il potenziale capacitivo di abbattimento di determinati gas ad effetto serra, a fronte dell'impiego di determinate specie vegetali autoctone.

Ulteriore strumento per la rendicontazione degli assorbimenti di CO₂, a seguito di azioni di Carbon *off-setting*, è anche il progetto *MyTree* sviluppato dal *Servizio forestale dell'Agricoltura degli Stati Uniti* che, naturalmente come lo strumento precedentemente menzionato, permette il calcolo dei benefici **potenziali** in termini di stoccaggio di CO₂, attraverso la piantumazione di una determinata specie vegetale (GBC Italia 2022d, pp. 89-90).

8. BOX 2- APPROFONDIMENTO DELLA METODOLOGIA TM54:2022

All'interno di questa sezione, si andrà ad affrontare la tematica riguardante le emissioni dovute dal consumo di energia nella fase di uso dell'edificio. Come riportato all'interno del già citato documento del RICS (RICS 2023), il calcolo dovrebbe condensare tutta l'energia effettivamente impiegata per il funzionamento dell'edificio; quindi, tenere in considerazione azioni come quelle di riscaldamento, utilizzo di acqua calda sanitaria, raffreddamento o illuminazione, le quali sono solo alcune delle voci che dovrebbero essere rendicontate da parte del valutatore.

Al fine della trattazione di questa fase, si ritiene opportuno citare le linee guida della TM54:2022 pubblicata dal Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) (CIBSE 2022).

Infatti, all'interno del documento, vengono forniti dettagli circa la predisposizione di un modello energetico il quale, attraverso un'azione di conversione del dato di output, sarà impiegato nella successiva contabilizzazione dei $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ della fase Operational.

Nel dettaglio, si precisa la necessità di suddividere il calcolo secondo tre diversi scenari di consumo energetico: basso, medio e alto. Tale suddivisione si adotta per considerare, e simultaneamente ridurre, possibili discrepanze tra il modello di calcolo e la realtà, risultando così consapevoli circa i punti di forza o di debolezza del manufatto sotto il punto di vista operativo, in modo da colmare quello che viene definito come "performance gap" (LETI 2023b, pp. 20-21).

La metodologia proposta consta di ben diciassette step che, a seconda della complessità del progetto, possono essere completati per intero o in parte. Contestualmente è possibile confrontarsi con una metodologia di tipo stazionario (ovvero basata su valori energetici di media mensile) o di tipo dinamico (basati su valori a risoluzione oraria).

L'impiego di tutti gli step è, tuttavia, preferibile per restituire un'indagine quanto più completa e accurata dei consumi riferiti al funzionamento dell'edificio, considerando (fin dalle prime fasi del progetto) alcune variabili che possono influenzare il risultato finale come, ad esempio: le ore di servizio richieste dagli occupanti, la tipologia degli occupanti e la scelta degli strumenti per la realizzazione del modello.

Di seguito si passerà quindi a trattare tutti i diciassette steps previsti, partendo dallo step zero.

STEP 0 *Scelta del livello di modellazione*

Lo step 0 prevede di individuare il criterio secondo il quale il progettista e/o il valutatore dovrebbero scegliere il metodo di modellazione energetica. Riflettere sugli strumenti da impiegare per la modellazione consente infatti un'analisi quanto mai più accurata sul progetto del futuro manufatto edilizio.

I modelli energetici, poi, si distinguono in modelli dinamici e stazionari.

I primi, sebbene tengano in considerazione dei valori statici nel tempo, permettono al contempo una valutazione sufficientemente accurata, soprattutto per edifici di moderata complessità e volume. I secondi, invece, permettono una conoscenza più profonda del progetto, così da stimare più dettagliatamente l'interazione di alcuni fattori esogeni con il

manufatto (la quale interazione potrebbe comportare un aumento sui consumi).

A titolo esemplificativo si riporta il caso delle pompe di calore. Infatti, tali sistemi richiedono di tenere in considerazione le condizioni metereologiche esterne risulta fondamentale poiché a seconda di queste, il coefficiente prestazionale (COP) della macchina potrebbe variare in modo significativo.

STEP 1 *Costruzione del modello*

In questo step si procede alla predisposizione del modello geometrico che sarà poi oggetto di analisi. All'interno di questa fase quindi, il valutatore considera vari punti come, ad esempio, la geometria del modello, al fine di poter successivamente tenere in conto ponti termici o fattori di ombreggiatura esterna, oltre che naturalmente valori di

trasmissione che possono caratterizzare elementi come finestre, muri e porte. Oltre questo, all'interno del primo *step* avviene anche quella viene definita come azione di "zonizzazione" ovvero la generazione di spazi e zone, con l'intento di poter prendere in esame anche i diversi carichi di fabbisogno energetico richiesti dal manufatto.

A questo si aggiungono poi ulteriori due momenti distinti.

Il primo è quello dell'identificazione dell'area pavimentata, al fine di stabilire il valore di kWh/m², rendendo più agevole una **comparazione** tra i valori di intensità energetica.

Inoltre, come riportato nella TM54:2022 (CIBSE 2022, p. 26), si ricorda che a seconda delle specifiche del progetto e dei valori da calcolare potrebbe essere richiesto al valutatore di tenere in considerazione diverse metriche di superficie come quelle di: Superficie Interna Lorda, Superficie Totale o Superficie Netta Affittabile, che potrebbero essere ad uso della determinazione di ulteriori fattori o parametri.

Il secondo momento descritto all'interno dello *step* 1 è poi quello dello studio dei dati meteorologici, i quali dovranno essere adatti alla **tipologia** di valutazione condotta ed espressamente dichiarati all'interno della valutazione.

STEP 2 *Stima delle ore di funzionamento e dei fattori di occupazione*

In questo *step* numero due, si analizzano le modalità con le quali l'edificio sarà successivamente utilizzato; quindi, in questo preciso passaggio valutatore è chiesto di

riflettere su caratteristiche proprie del progetto (come la destinazione d'uso del manufatto) e di stimare anche il quantitativo di ore che saranno richieste per il servizio e il funzionamento dei vari sistemi. Una stima e una rendicontazione in tal senso, infatti, permetterà anche una efficienza energetica di gran lunga migliore poiché si eviterà di procedere con un uso **improprio** di risorse.

A tal proposito quindi, si inseriscono nel calcolo voci di *input* come quelle che notoriamente vengono definite fattori di occupazione, i quali sintetizzeranno la densità di occupazione e il grado di utilizzo dell'edificio.

STEP 3 *Valutazione del consumo di energia per l'illuminazione*

In questo passaggio si studiano i consumi connessi all'illuminazione interna, la quale dovrebbe considerare valori relativi, ad esempio, alla luce diurna o la presenza di tende per controllare fenomeni di abbagliamento interno. All'interno di questo *step* si tiene a citare il calcolo proposto dalla TM54:2022 (CIBSE 2022, p. 26), basato sui principi del *Lighting Energy Numeric Indicator* (LENI) e della EN 15193:2017 (UNI 2017). Il calcolo proposto, riportato nella pagina a seguire, oltre a prendere in considerazione il consumo energetico annuale per l'illuminazione interna, considera anche i carichi "parassiti" come, ad esempio, quelli derivanti dall'uso di dispositivi digitali.

All'interno della formula proposta, per *PN* si intende la potenza di illuminazione totale installata nella zona individuata, (in *W*), per *FC* il fattore di illuminazione costante, per *FD* il fattore di dipendenza dalla luce diurna, per *tD* il

[25] *Consumo energetico annuale per l'illuminazione interna = Energia utilizzata per l'illuminazione (WL) + Consumo energetico in stand-by ("parassita") (W/P) [kWh/annuo]*

$$WL = \frac{\{(PN * FC) * [(tD * FO * FD) + (tN * Fo)]\}}{1000} \quad [kWh/annuo]$$

$$W/P = (W/pc + W/em) \quad [kWh/annuo]$$

quantitativo in ore di luce diurna, per tN il quantitativo in ore di luce non diurna, per W/pc invece si intende l'energia in *standby* (kWh) e infine per W/em il consumo di energia per sistemi emergenziali posti in *standby*.

Inoltre, si precisa che, all'interno della già citata norma EN 15193, vengono proposti dei valori *standard* di consumo di energia parassita impiegabili all'interno della metodologia, seppur affetti da una discrepanza più o meno accentuata nei confronti della realtà.

STEP 4 *Valutazione del consumo di energia per ascensori e scale mobili*

Lo step non si applica al caso di studio oggetto della tesi, pertanto si rimanda al documento TM54:2022 (CIBSE 2022) per una sua completa restituzione.

STEP 5 *Valutazione del consumo di energia per la small power*

In questo passaggio viene preso in considerazione il carico energetico **richiesto** per tutti quei dispositivi di uso quotidiano, che seppur richiedono un consumo di energia il più delle volte non così considerevole, possono portare comunque a picchi di potenza **richiesta** essenziali da stimare ai fini di una valutazione

energetica. Inoltre, questi carichi talvolta complessi da stimare apportano all'interno dell'architettura anche dei guadagni in termini di calore che possono condurre in implicazioni circa i carichi di riscaldamento e raffrescamento richiesti.

STEP 6 *Valutazione del consumo energetico per la ristorazione*

Lo step non si applica al caso di studio oggetto della tesi, pertanto si rimanda al documento TM54:2022 (CIBSE 2022) per una sua completa restituzione.

STEP 7 *Valutazione del consumo energetico per le sale server*

Lo step non si applica al caso di studio oggetto della tesi, pertanto si rimanda al documento TM54:2022 (CIBSE 2022) per una sua completa restituzione.

STEP 8 *Valutazione del consumo energetico di impianti e attrezzature aggiuntivi*

Lo step non si applica al caso di studio oggetto della tesi, pertanto si rimanda al documento TM54:2022 (CIBSE 2022) per una sua completa restituzione.

STEP 9 Valutazione del consumo energetico dell'ACS (acqua calda sanitaria)

In questo passaggio, si esaminano i consumi energetici connessi alla fornitura di acqua calda sanitaria (CIBSE 2022, pp. 39-40).

In questo senso, la TM54:2022 fornisce informazioni riguardanti gli scopi del manufatto o il numero di occupanti, i quali risultano essere delle nozioni fondamentali per la generazione di un profilo di domanda e, conseguentemente, del consumo di energia richiesto.

Per poter compiere queste operazioni, da parte della TM54:2022, vengono forniti dei valori di *benchmark* utilizzabili qualora si fosse sprovvisti di tali dettagli. La tabella seguente, quindi, riassume dei valori medi impiegabili nel

caso di abitazioni private.

Tali valori, riportati in Tabella 33, poi possono essere impiegati al fine di rendicontare il consumo energetico annuo, il quale è conseguente al calcolo del fabbisogno di massa di acqua prevista, come dimostrato all'interno della formula [26] dove per C_p si intende la capacità termica specifica dell'acqua e per DT la differenza di temperatura tra acqua di mandata e di ritorno.

STEP 10 Apporto di guadagni termici interni al modello

All'interno di questo step, la TM54:2022 del CIBSE esamina la rendicontazione di **tutti** gli apporti termici derivati dall'utilizzo

Tipo di edificio	Fabbisogno giornaliero (l/persona)	Stoccaggio per domanda di 24 ore (l)	Periodo di recupero (ore)
Tipologie abitative			
- economico, autorità locale	115	115	4.5
- medio, di proprietà privata	115	45	2.0
- lusso, di proprietà privata	125	45	2.0

Tab.33 Domanda giornaliera di Acqua Calda (elaborazione da parte dell'autore su fonte TM 54:22 [37])

[26] $Massa\ d'acqua = consumo\ giornaliero\ di\ acqua\ per\ persona\ (litri/persona) * densità\ di\ acqua\ (kg/litro) * numero\ di\ occupanti * numero\ di\ giorni\ occupati\ [kg]$

$$Consumo\ energetico\ annuo = massa\ d'acqua\ (kg) * DT\ (K) * C_p\ (kJ/kg * K) \quad [kWh/annuo]$$

3600

N.B. Il fattore numerico 3600 converte il consumo di energia da kJ a kWh

di apparecchiature o da caratteristiche proprie dell'immobile (come l'orientamento o la stratigrafia di involucro), che potranno comportare un beneficio in termini di riscaldamento degli ambienti interni nella stagione invernale o uno svantaggio ai fini di raffrescamento durante la stagione estiva.

All'interno del modello, quindi, sarà richiesto al valutatore di tenere in considerazione diversi **fattori** come: l'orientamento dell'edificio, il numero degli occupanti, la tipologia di attività svolta da questi e infine anche la tipologia di impianti presenti all'interno dell'edificio (ad esempio di illuminazione, di riscaldamento o di apparecchi definiti *small power*). Importante notare che, ai fini del calcolo, all'interno della maggior parte dei *software*, sia di tipo dinamico che di tipo statico, alcuni di questi guadagni solari (come quelli derivanti dalla geometria o dal numero di occupazione) sono direttamente calcolati (CIBSE 2022, pp. 42).

STEP 11 *Modellazione dei Sistemi HVAC*

In questo passaggio si esaminano i sistemi HVAC ovvero tutti quei sistemi preposti al riscaldamento, alla ventilazione e al condizionamento dell'aria (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), al fine di poter stimare il consumo che questi sistemi richiedono per garantire il *comfort* interno all'abitazione.

Al fine di stabilire ciò vi sono diversi parametri da dover tenere in considerazione, uno su tutti il carico di aria fresca, ovvero il carico fornito meccanicamente dal sistema di ventilazione. Questo passaggio risulta essere **fondamentale** per stabilire quella che è la portata d'aria prevista dal progetto, facendo

attenzione circa le specifiche riguardanti il flusso volumetrico tra aria di mandata e di ritorno.

Un secondo parametro da stimare, al fine di un conteggio il più possibile realistico del consumo del sistema HVAC, è poi quello della modellazione delle pompe di calore previste all'interno del progetto. Difatti, queste dovrebbero essere modellate prendendo in considerazione diverse **specifiche** come, ad esempio, la temperatura dell'acqua richiesta dalle utenze, le condizioni operative della macchina (intese come la presenza di impianti di accumulo), la valutazione in merito i carichi parziali o la determinazione delle condizioni termiche esterne.

Questa analisi dettagliata, così svolta, dovrebbe permettere un conteggio del consumo energetico più preciso, se comparato a quello che potrebbe derivare impiegando esclusivamente il coefficiente di *performance* stagionale della macchina.

Infine, ulteriori parametri da includere nel calcolo sono quelli in merito, ad esempio: al periodo di preriscaldamento delle macchine, ovvero il tempo impiegato dalla macchina per entrare in funzione e rispondere ai requisiti richiesti; al consumo di energia richiesto da sistemi di umidificazione o deumidificazione; alla determinazione della tipologia di fonte energetica impiegata dal sistema e infine alla presa in considerazione di una **strategia** circa i controlli da adoperare ciclicamente per garantire il funzionamento del sistema HVAC.

STEP 12 *Considerazioni critiche in merito alla gestione energetica*

All'interno di questo passaggio, il documento, ricorda al valutatore di procedere d'ora in avanti con un ruolo proattivo alla valutazione energetica, strutturando il suo lavoro in maniera critica al fine di individuare, e conseguentemente risolvere, i possibili rischi operativi a cui l'edificio può essere esposto.

STEP 13 Analisi di sensibilità

Nel seguente *step* vengono forniti gli strumenti per poter compiere un'analisi di sensibilità, la quale risulta fondamentale per poter accrescere il livello di **conoscenza** circa i consumi dell'edificio. Infatti, per *analisi di sensibilità* si intende un'operazione di test che, apportando delle modifiche ai dati di *input* del modello (uno alla volta) **perturba** il valore complessivo sui consumi del modello di base e, così facendo, rende il valutatore effettivamente in grado di comprendere quali voci potranno influenzare maggiormente il risultato e prevedere quindi l'attuazione di alcune strategie.

La perturbazione appena descritta può essere ad esempio: la modifica dei valori di input riguardo le condizioni meteorologiche di progetto o la densità degli occupanti e il comportamento degli stessi (ad esempio eccedendo negli apporti termici interni derivanti da un utilizzo prolungato di un impianto). Al fine di poter garantire uno studio ancor più accurato, potrebbe essere richiesto al valutatore di redigere anche degli studi di sensibilità parametrica, ovvero degli studi completi che, al fine di garantire un approccio **olistico** di studio, permettano la variazione in contemporanea di due o più variabili.

Inoltre, al valutatore, potrebbe anche

essere richiesta un'analisi di incertezza ovvero un'indagine che possa permettere la quantificazione del livello di **affidabilità** del dato di input.

STEP 14 *Test dello scenario*

Al fine di poter prendere in considerazione una moltitudine di possibili utilizzi dell'edificio e poter anche tenere in conto dell'incertezza che ovviamente caratterizzerà il calcolo, si propone all'interno di questo passaggio di presentare i risultati del processo di modellazione, secondo diversi **scenari** (riportati in Tab.34): il primo dovrebbe essere uno "*scenario medio*" ovvero una modellazione che poggi su considerazioni e ipotesi ragionevoli, mentre attraverso delle considerazioni estreme si dovrebbe redigere anche uno scenario "*pessimistico*" e infine uno "*ottimistico*", in cui i valori circa il tempo di funzionamento di un apparecchio, la densità prevista degli occupanti o ad esempio le condizioni meteorologiche potrebbero presentare delle caratteristiche estremamente favorevoli o estremamente avverse in termini di consumo di energia richiesto.

Detto ciò, gli scenari dovrebbero derivare da considerazioni **plausibili e puntuali** e, come scritto all'interno della TM54:2022, non dovrebbero provenire da un "*approccio globale*" (CIBSE 2022, p. 50) ovvero da una variazione sul risultato, ad esempio, del più o meno 10%.

STEP 15 *Revisione dei risultati rispetto agli obiettivi e benchmark*

In questo passaggio viene proposta sostanzialmente una fase di revisione dei risultati verificando se le scelte in sede progettuale

	Pessimistico	Medio	Ottimistico
Efficienza luminosa (lm/w)	115	105	95
Set point del riscaldamento interno (°C)	19	21	22
Ore occupate	9-5	8-6	7-8
Permeabilità all'aria (m³/m²/ora)	1	3	5
Distribuzione ACS Efficienza (%)	15	90	85

Tab.34 Scenari di modellazione energetica dipendenti dalle condizioni meteorologiche (elaborazione da parte dell'autore su fonte LETI [27])

siano conformi ai requisiti previsti o se potrebbe essere possibile un'ulteriore fase di **affinamento** del risultato in termini di consumo richiesto. Tale revisione dovrebbe confrontarsi con le specifiche norme vigenti o potrebbe anche basarsi su un'operazione di benchmark, confrontandosi quindi con i risultati di casi studio simili, analizzando se all'interno del foglio di calcolo siano state attentamente analizzate tutte le voci richieste e comunemente considerate dal mercato.

STEP16 Reportinge matrice di implementazione

In questo *step* invece si definiscono le **modalità** di presentazione circa i risultati ottenuti.

Difatti, questi dovrebbero essere in grado di rispecchiare alcune caratteristiche come ad esempio: la fonte delle informazioni impiegate per i dati di *input*, il livello di accuratezza delle fonti stesse, i presupposti chiave (fatti a monte del processo di valutazione), il confronto dei

risultati con gli obiettivi di progetto proposti e, da ultimo, la presentazione dei risultati nei diversi scenari individuati. Infine, si precisa che all'interno di questo *step*, la TM54:2022 ricorda al valutatore di andare a compilare quella che viene definita la *matrice di implementazione* al cui interno vengono riassunte tutte le caratteristiche sulle voci impiegate per la compilazione della metodologia proposta.

Nella Tab. 35, si propone uno stralcio della matrice di implementazione proposta dal CIBSE (CIBSE 2022, pp. 55-61).

STEP 17 Garanzia di qualità (QA)

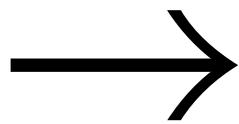
In questo ultimo passaggio la TM54 :2022 esplicita la necessità, da parte del valutatore, di impiegare all'interno della modellazione (qualsiasi sia il grado di dettaglio della stessa) dei valori di *input* che abbiano un livello **adeguato** di qualità e di affidabilità, essendo i valutatori stessi responsabili circa il funzionamento del modello studiato.

Infine, si tiene a specificare che come previsto dal CIBSE, negli anni che seguono la modellazione al valutatore è richiesta un'azione di controllo e supervisione, definita come analisi POE (*Post Occupancy Evaluation*) al fine di garantire il corretto funzionamento dell'edificio negli anni e identificando possibili differenze non previste, ad esempio con quanto stimato a livello di consumo e con quanto effettivamente consumato. Questo passaggio funge da chiave di volta al fine di un efficientamento costante negli anni , attraverso un aggiornamento costante, del dato desunto (CIBSE 2022, p. 61).

TM54 steps	Raccomandazioni	Modelling approach	Probabilità	Confidence level	Q/A check
Step 2: Stima delle ore di utilizzo e dei fattori di occupazione	<i>Richiedere al cliente dei profili operativi, ad esempio tramite colloquio</i>	<i>Valori PHPP di default impiegati, da comprendere l'effettivo ammontare dei valori reali dopo l'occupazione del manufatto</i>	$\pm 50\%$	<i>Basso</i>	<i>Si raccomandano ulteriori discussioni con la committenza per comprendere se sarà necessario modificare i valori inseriti</i>

Tab.35 Stralcio di una matrice di implementazione (elaborazione da parte dell'autore su fonte TM54:22 [37])





TERZA PARTE

TERZA PARTE

9. PROGETTO BIOCASA SAROTTO 2007

10. VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON DELLA BIOCASA SAROTTO 2007

11. PROGETTO BIOCASA SAROTTO 2050

12. VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON DELLA BIOCASA SAROTTO 2050

13. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

9. PROGETTO BIOCASA SAROTTO 2007

All'interno di questo nono capitolo, si procederà con la presentazione del caso studio oggetto di tesi, ovvero la BioCasa Sarotto realizzata dall'impresa "Sarotto Group" nel 2007 a Narzole in provincia di Cuneo.

Il capitolo 9 è quindi suddiviso in due principali momenti. Nel primo si presenta il caso studio, restituendone una trattazione puramente descrittiva circa le tecnologie e i sistemi costruttivi impiegati dall'impresa per la realizzazione della biocasa.

La seconda sezione invece ospita degli elaborati tecnico-grafici, prodotti dal tesista stesso al fine di mostrare al meglio il manufatto edilizio che sarà poi oggetto di valutazione WLC all'interno del successivo capitolo.

Il **caso studio** scelto per la contabilizzazione della WLC è l'edificio residenziale realizzato nel 2007 da parte della società "Sarotto Group", nel cuneese.

Il progetto in questione è stato scelto, da parte del diretto interessato e dai suoi relatori di Tesi, poiché reputato come un'architettura capace di esprimere un sincero interesse in merito alle questioni ambientali ed energetiche proprie del settore delle costruzioni.

L'abitazione, che prende il nome di *BioCasa Sarotto*, si compone di due livelli fuori terra con una superficie netta calpestabile di 164 m² la quale è il risultato di una volumetria

compatta, appositamente studiata per una minor dispersione di calore possibile.

Inoltre, l'**orientamento** dell'abitazione (con una zona giorno pienamente a sud ed una zona notte a nord) permette all'abitazione di godere di un ampio ingresso di luce naturale durante la giornata, garantendo in questo modo una buona visibilità ed un buon apporto di carichi termici gratuiti, oltre che di una facilitazione nel ricircolo dell'aria interna.

Di fatti, se a lato **sud** la facciata principale è composta da grandi finestrate, la facciata nord si caratterizza per una sua ermeticità, data dal posizionamento in questa area della zona

dell'autorimessa, la quale permette di ottenere uno spazio "cuscino" nei confronti delle dispersioni termiche da parte dell'area giorno verso l'esterno. Il riscaldamento e il raffrescamento, invece, sono garantiti dall'installazione a pavimento di pannelli radianti che, grazie alla loro integrazione con una pompa di calore di tipo idronico e alla bassa temperatura di mandata del fluido termovettore, garantisce i livelli di comfort richiesti dalle normative cogenti assieme ad una riduzione dei consumi energetici durante la fase di esercizio.

Per quel che concerne invece l'**involucro** esterno, l'abitazione prevede un sistema di elevazione prefabbricato (realizzato con moduli prodotti dalla stessa "Sarotto Group") composto da due diversi *layers* di pareti in calcestruzzo prefabbricato, con l'intermezzo di isolanti a base petrolifera e strato di finitura superficiale in intonaco di calce (raggiungendo in questo modo una trasmittanza finale di $0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$). Per una soddisfacente solidità **strutturale**, i suddetti pannelli prefabbricati sono poi agganciati a dei pilastri di calcestruzzo gettato in opera, dalle dimensioni di $18 \times 40 \text{ cm}$, i quali scaricano il loro peso su una sottostante struttura di fondazione continua, naturalmente sempre in calcestruzzo gettato in opera, in cui trova spazio un vespaio areato impiegato per l'allontanamento del gas radon contenuto nel suolo sottostante.

Per quanto riguarda invece la struttura di copertura questa viene realizzata con una soletta di tipo *predalles* prefabbricata, isolata grazie all'impiego sempre di isolanti a base petrolifera e infine conclusa con l'impiego di una lamiera di acciaio (raggiungendo una trasmittanza finale pari a $0,156 \text{ W/m}^2\text{K}$). In

particolar modo, il profilo del tetto presenta una falda principale inclinata di 35° , al fine di garantire ai 24 moduli **fotovoltaici** posti in copertura una perfetta ricezione dei fotoni della luce, così da efficientare il più possibile la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, impiegata poi per l'alimentazione della pompa di calore e di tutte le *utilities* interne.

Infine, per quanto concerne le **aperture** (ovvero gli infissi e i serramenti) queste sono poste su tutti e quattro i lati dell'abitazione e sono, nella loro totalità, realizzate da profili in alluminio e da pannellatura in vetro camera, all'interno dei quali trovano spazio dei sistemi meccanizzati di veneziane al fine di regolare e agevolare l'ingresso della luce solare all'interno della residenza.

In conclusione, al fine di rendere **architetticamente** ancor più chiaro il progetto, si procede di seguito con la presentazione del caso studio di riferimento attraverso *reportage* fotografico ed elaborati di natura tecnica (prodotti dall'autore stesso).



Fig. 35 La Biocasa Sarotto 2007 vista dal suo prospetto sud-est (fonte <https://www.sarotto.it/biocase-prefabbricate/>)



Fig. 36 La Biocasa Sarotto 2007 vista interna (fonte <https://www.sarotto.it/biocase-prefabbricate/>)



Fig. 37 La Biocasa Sarotto 2007 vista interna (fonte <https://www.sarotto.it/biocase-prefabbricate/>)

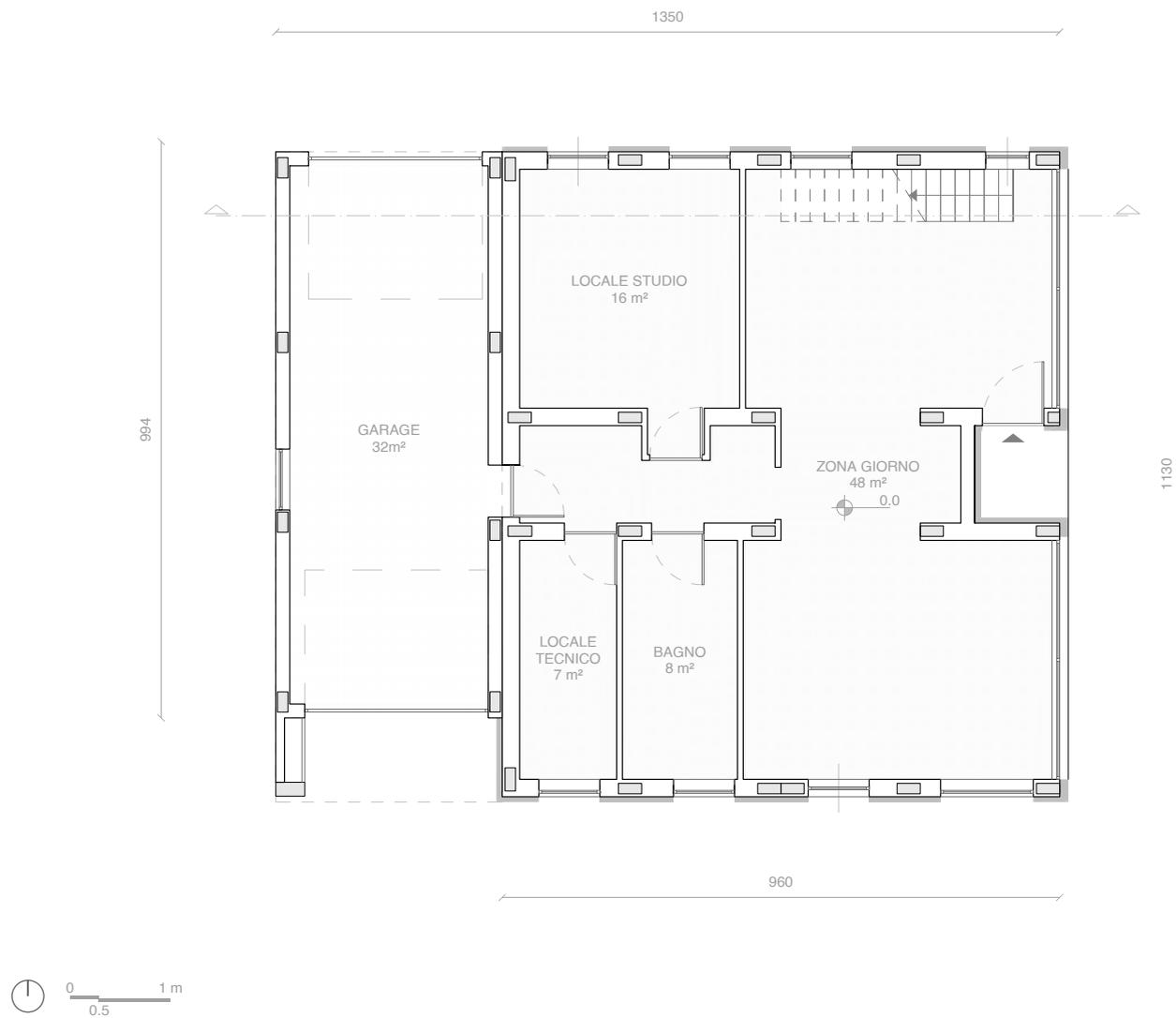


Fig. 38 Restituzione da parte dell'autore della pianta della Biocasa Sarotto 2007 al piano terra

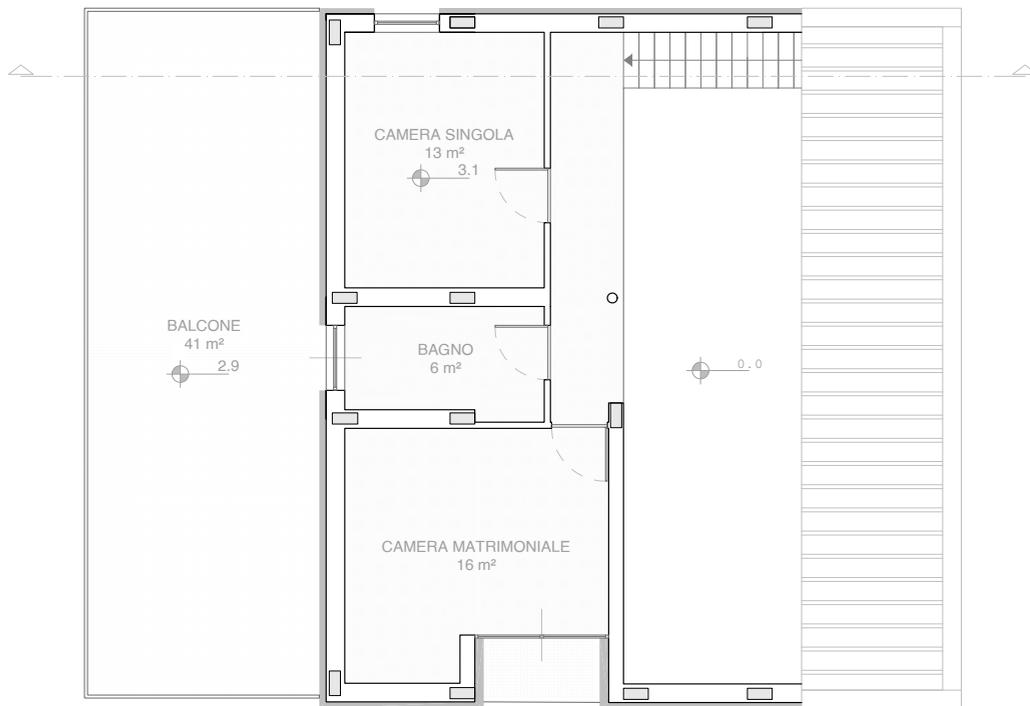


Fig. 39 Restituzione da parte dell'autore della pianta della Biocasa Sarotto 2007 al piano primo

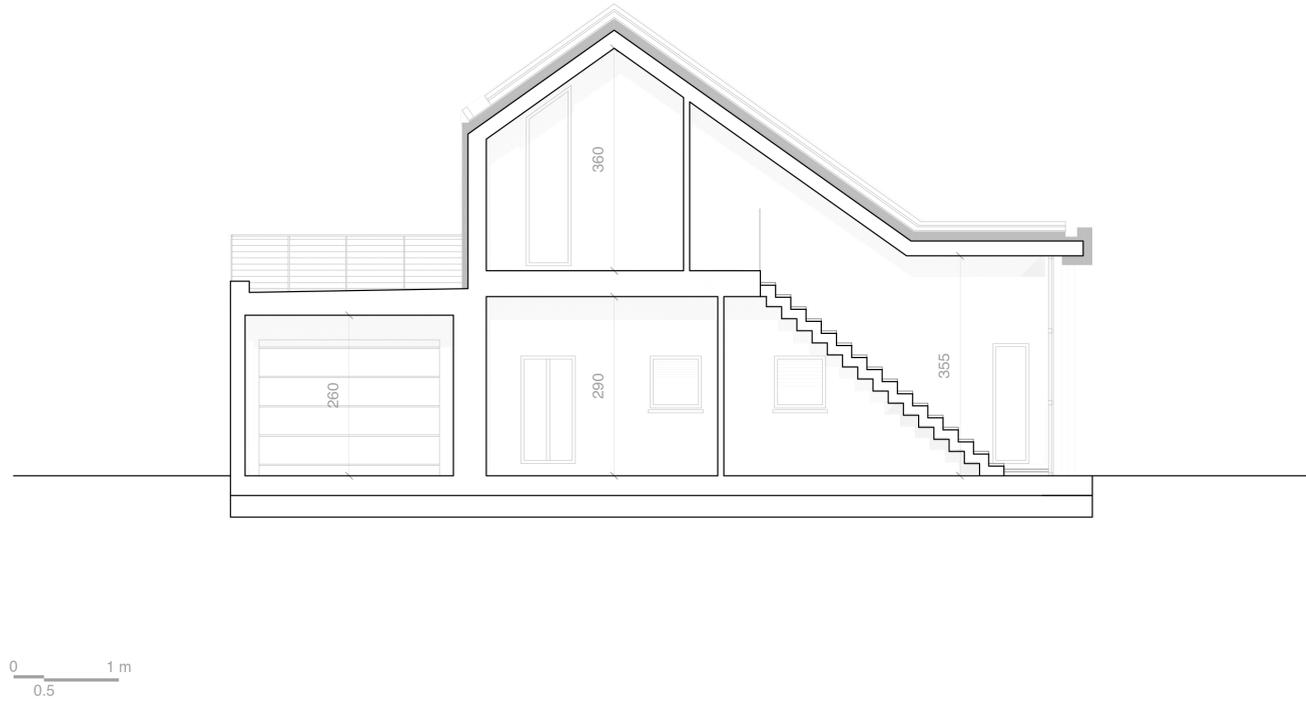


Fig. 40 Restituzione da parte dell'autore della sezione principale della Biocasa Sarotto 2007

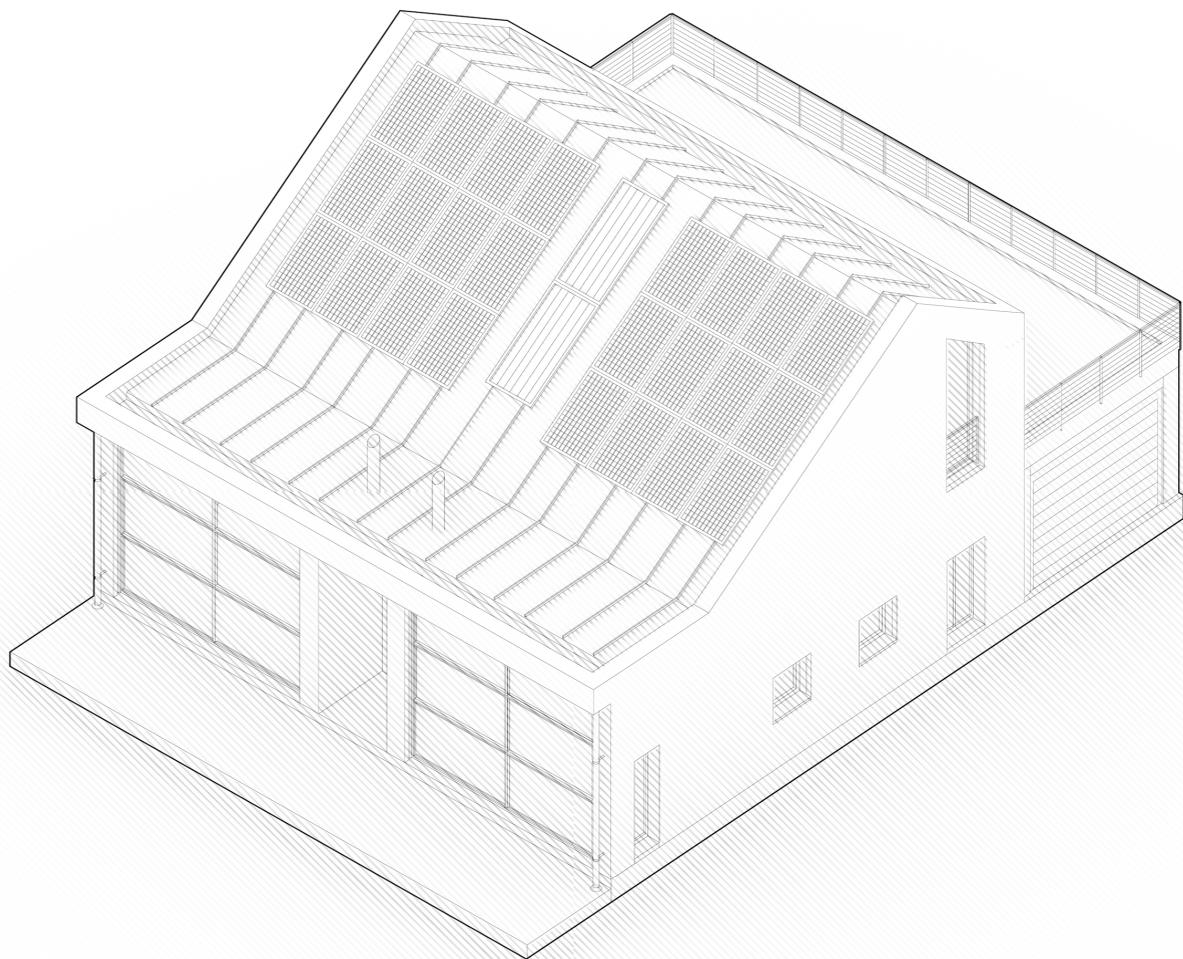


Fig. 41 Restituzione da parte dell'autore della Biocasa Sarotto 2007 in vista assonometrica

10. VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON DELLA BIO CASA SAROTTO 2007

Il capitolo dieci si procederà con la contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica riscontrate durante il ciclo di vita, al fine di poter calcolare la Whole Life Carbon del progetto in questione. Innanzitutto, si intende procedere alla contabilizzazione suddividendola in tre macro-rendicontazioni: quella architettonica (legata quindi all' Embodied Carbon dei materiali e delle componenti edilizie impiegati), quella della fase di Uso, ovvero la fase B6 e la fase B7 (procedendo in questo modo con la rendicontazione della quota di emissioni legate all'Operational Carbon) e infine, si prevede di contabilizzare la parte impiantistica (quindi calcolando l'Embodied Carbon dei sistemi definiti precedentemente come sistemi MEP). Come ultimo passo, ma del tutto a parte rispetto al calcolo inerente alla WLC del progetto, si propone anche un calcolo predittivo nei confronti del livello di circolarità del progetto andando quindi a rendicontare l'Embodied Carbon della fase D (definita come fase oltre il ciclo di vita).

Inoltre, si ritiene fondamentale specificare che per tale rendicontazione, si è deciso di adottare un approccio metodologico di base, poiché sebbene le informazioni rispetto all'architettura fossero più che dettagliate e accessibili, al contempo la carenza di certificazioni ambientali (ad esempio EPD) non consentono una contabilizzazione "avanzata" della Whole Life Carbon.

Per questa ragione, come primo passo si è deciso fin da subito di impiegare, per la contabilizzazione dell'Embodied Carbon del manufatto edilizio, la banca dati tedesca Ökobaudat, la quale è risultata la scelta migliore per tre ordini di motivi: la relativa vicinanza con il contesto italiano, la facilità di consultazione e la quantità di generic data desumibili all'interno del database, i quali risultano essere suddivisi ogni volta secondo le varie fasi del ciclo di vita, agevolando in questo modo le

operazioni di accounting. Inoltre, si specifica che come scenario temporale di riferimento, si è scelti un numero pari a cinquanta anni. Questo, infatti, rappresenta lo scenario di riferimento comunemente condiviso da tutti i report e le ricerche analizzate, per il caso residenziale, all'interno della "Parte 2" del lavoro di Tesi.

I risultati ottenuti a termine della contabilizzazione di ogni singola fase saranno restituiti sia sottoforma di kgCO_2eq sia di $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/\text{anno}$ (e suddivisi ogni volta secondo i principali elementi edilizi presenti) al fine di facilitare la comparazione tra le diverse fasi del ciclo di vita conteggiate e di allinearsi alle indicazioni del progetto europeo "Indicate", presentato all'interno della "Parte 1" (Capitolo 4.5.).

Di seguito si procederà con la restituzione dei risultati desunti in ogni singola fase del ciclo di vita le quali, per una più efficace divulgazione, saranno descritte attraverso l'impiego di elaborati grafici e tabellari e, qualora ve ne fosse la necessità, di allegati puntuali che potranno essere consultati dal lettore nella parte conclusiva del lavoro di Tesi.

		FASE DI PRODUZIONE			FASE DI COSTRUZIONE		FASE DI USO					FASE DI FINE VITA				OLTRE I CONFINI DEL SISTEMA
MODULI	FASI	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
		APPROVVIGIONAMENTO DI MATERIE PRIME	TRASPORTO	PRODUZIONE	TRASPORTO	COSTRUZIONE	USO	MANUTENZIONE	RIPARAZIONE	SOSTITUZIONE	RISTRUTTURAZIONE	DEMOLIZIONE	TRASPORTI	TRATTAMENTO RIFIUTI	DISMISSIONE	POTENZIALE RIUSO, RECUPERO E RICICLO
							B6									
							USO DI ENERGIA									
							B7									
							USO DI ACQUA									

Fig.42 Suddivisione delle fasi del ciclo di vita contemplate per la valutazione della Whole Life Carbon della "BioCasa Sarotto 2007"

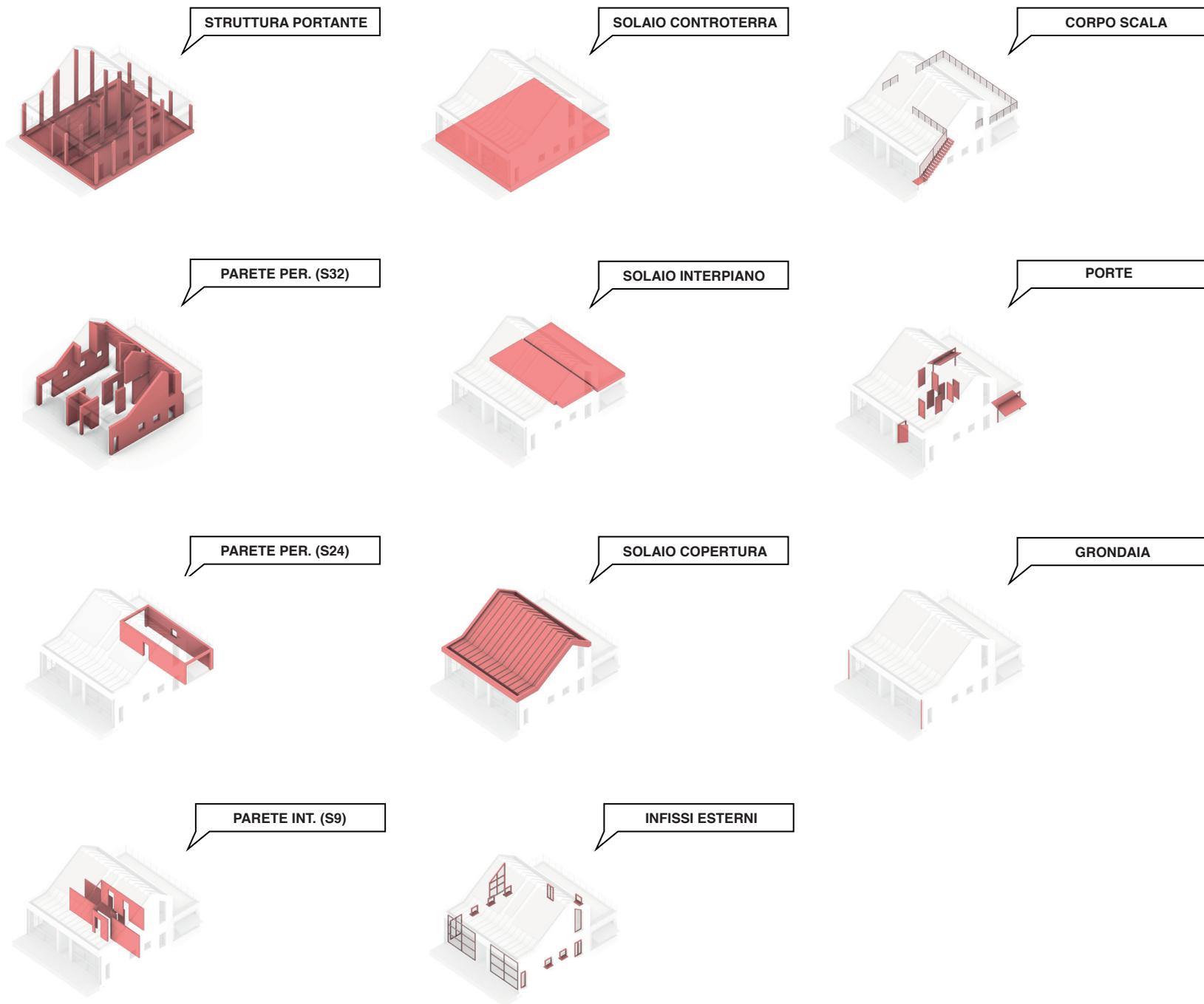


Fig.43 Suddivisione del manufatto edilizio "BioCasa Sarotto" nei suoi principali elementi edilizi contemplati per il calcolo della WLC

10.1. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI PRODUZIONE (A1-A3)

All'interno di questa prima contabilizzazione si sono prese in considerazione le emissioni di anidride carbonica provenienti dai processi di estrazione, trasporto e trasformazione dei prodotti da essere conferiti al sito di **cantiere** del cuneese.

La contabilizzazione di questi processi, la quale ha contemplato **ogni** elemento tecnico edilizio caratterizzante l'abitazione (come esplicitamente mostrato in figura 43) è avvenuta grazie all'impiego della banca dati tedesca *Ökobaudat* di cui sono stati presi in considerazione i relativi *generic data*, rispettando in questo modo i procedimenti previsti per una contabilizzazione della *Embodied Carbon* tramite metodologia di base.

Inoltre, grazie alla costante collaborazione con l'impresa è stato possibile desumere, sulla base di elaborati tecnici, le quantità di materiali **effettivamente** impiegate per la realizzazione del manufatto che, come visto in precedenza, corrispondono a quantità definite di *Design as Built*. Dovendo però contabilizzare l'*Embodied Carbon* associata non solo al quantitativo di materiale previsto da progetto, bensì al **totale** dei materiali consegnati al cantiere, è stato doveroso procedere anche con la quantificazione della *Bill of quantities*, il cui ammontare è stato calcolato attraverso l'associazione di un fattore correttivo (*fpro*) al quantitativo di materiale di *Design as Built*. Tale **fattore**, infatti, ha permesso di contabilizzare l'*Embodied Carbon* anche di tutti quei rifiuti prodotti durante la realizzazione del manufatto.

La stima di tale fattore, che differisce a seconda del materiale preso in considerazione, è stata desunta attraverso la consultazione del già citato report del GBC Italia, *Strumenti per la decarbonizzazione: Contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio* (GBC Italia 2022d, pp. 41-42).

In seguito, una volta desunto il totale dei quantitativi impiegati all'interno del progetto, è stato possibile associare a tali **quantità** il valore unitario di *Embodied Carbon* corrispondente (desunto da banca dati *Ökobaudat*), al fine di poter contabilizzare il totale di *Embodied Carbon* (EC_{A1-A3}) corrispettivo ad ogni singolo materiale impiegato. Nella fattispecie, si specifica che la restituzione dei risultati di *Embodied Carbon*, ottenuti e riscontrati all'interno della fase di Produzione (A1-A3), è avvenuta **suddividendo** i valori di EC per le singole unità tecnologiche riscontrate all'interno del manufatto edilizio (come, ad esempio, pareti perimetrali o interne oppure solai di copertura piuttosto che di interpiano), con l'intento di rendere più chiara e agevole la lettura dei risultati ottenuti.

Si specifica, infine, che le procedure di contabilizzazione dell'*Embodied Carbon* per la fase A1-A3 sono spiegate e trattate in maniera **puntuale** all'interno dell'*Allegato 1* e che, per rendere più agevole la lettura, sono presentate in maniera del tutto sintetica all'interno di questa fase. Di seguito, si propongono i risultati di EC_{A1-A3} desunti per i singoli componenti edilizi contabilizzati, sia in forma **tabellare** che in forma **grafica** in Figura 44, da cui si evince chiaramente come i maggiori apporti di EC siano conseguenti alla produzione della struttura portante cementizia.

EC A1-A3

Elementi edilizi	kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante</i>	26 448.6
<i>Pareti perimetrali (S32)</i>	11 716.3
<i>Pareti perimetrali (S24)</i>	2 816.3
<i>Pareti interne (S9)</i>	2 103.4
<i>Solaio controterra</i>	10 506.3
<i>Solaio interpiano</i>	5 677.6
<i>Solaio di copertura</i>	8 265.0
<i>Infissi esterni</i>	4 902.6
<i>Corpo Scala</i>	2 094.5
<i>Porte</i>	1 096.1
<i>Grondaia</i>	65.3

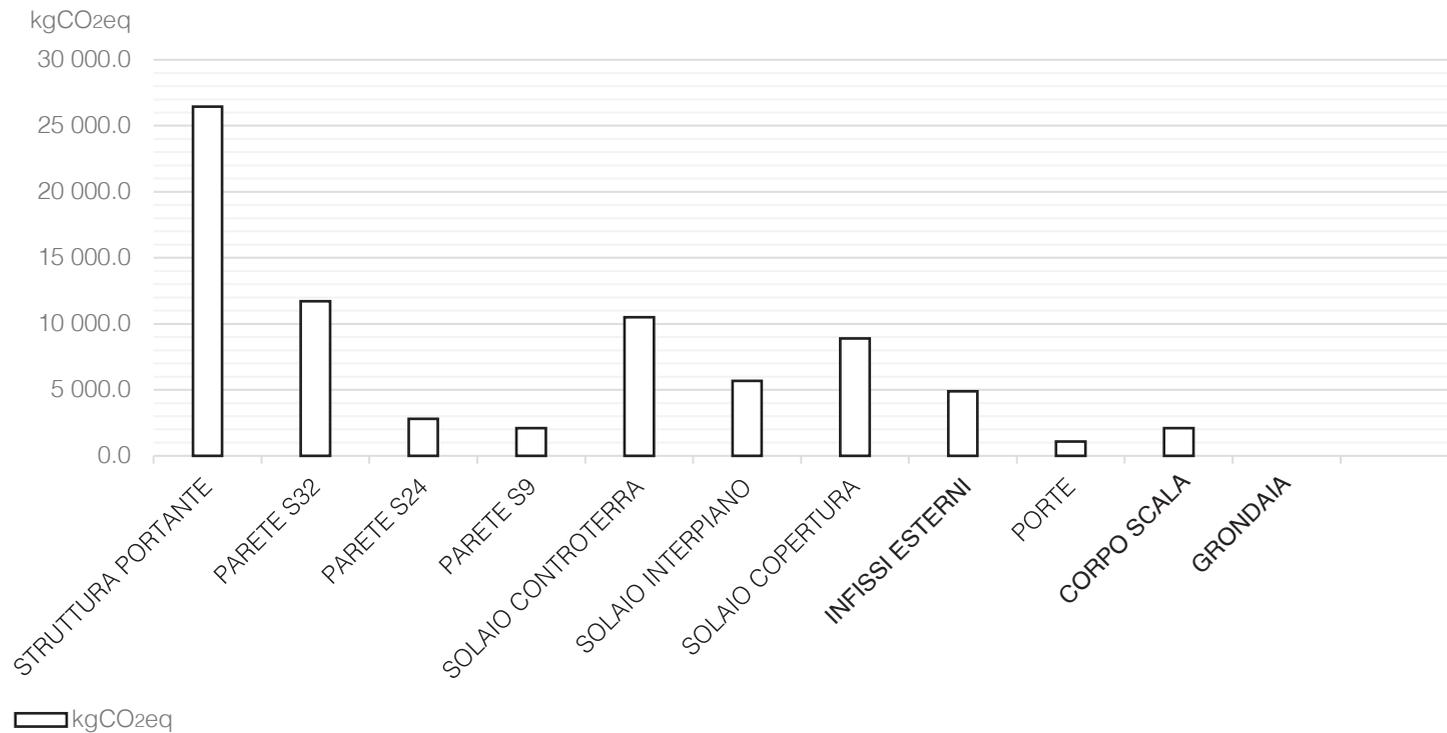
76 054.5

Fig.44 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fasi A1-A3 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Successivamente, si ricorda che all'interno di questa fase, ma in modo distinto e separato rispetto alla contabilizzazione dell'*Embodied Carbon A1-A3*, si è proceduto con la contabilizzazione della *Carbon Sequestration* ("CS") la cui contabilizzazione rappresenta uno dei punti più **contraddistintivi** per gli elementi a base lignea all'interno della metodologia, anche nel caso del metodo **base** (come ampiamente trattato all'interno del "BOX 1").

Difatti, seppur in minima parte rispetto agli elementi cementizi, all'interno del manufatto sono stati riscontrati **tre** principali elementi tecnici in legno, ovvero: la struttura di sostegno allo strato di rivestimento superiore del solaio di copertura, le porte interne dell'abitazione e infine le pedate appartenenti al corpo scala.

Questi tre elementi, hanno perciò giustificato un calcolo base finalizzato alla contabilizzazione del quantitativo di carbonio **stoccato** (definito comunemente come "carbonio biogenico") dagli elementi a base legno durante il loro ciclo di vita.

Inoltre, per poter procedere a questa contabilizzazione, si è scelto di adottare un

valore generico di CS_{A1-A3} , desunto dal documento RICS, pari a $1,64 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ stoccata per ogni kg di prodotto impiegato ottenendo in questo modo, tramite un elementare moltiplicazione, il **totale** di carbonio biogenico stoccato dagli elementi tecnici a base legno del manufatto edilizio.

Infine, nella tabella sottostante (Fig. 45) sono riassunti i valori desunti di CS_{A1-A3} per gli elementi lignei individuati, mentre a pagina seguente sono riportati i valori conclusivi di EC e CS appartenenti alle fasi del ciclo di vita **A1-A3**.

	CS A1-A3 kgCO ₂ /kg	Peso kg	CS A1-A3 tot. kgCO ₂
<i>Solaio di copertura- Strato di supporto in legno</i>	1.64	318.8	526.1
<i>Corpo scala- Pedata in legno</i>	1.64	101.9	168.2
<i>Porta interna tamburata</i>	1.64	185.8	306.6
<i>Porta di ingresso legno lamellare</i>	1.64	83.3	137.5
			- 1 138.3

Fig.45 Suddivisione dei contributi di Carbon Sequestration nelle fasi A1-A3

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A1-A3	76 054.5	EC A1-A3	7.65
Carbon Sequestration	kgCO ₂ eq	Carbon Sequestration	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
CS A1-A3	-1 138.3	CS A1-A3	-0.11

10.2. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI COSTRUZIONE (A4-A5)

10.2.1 EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO AL CANTIERE (A4)

All'interno di questa fase, si procede alla contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica associate alle operazioni di trasporto verso il **sito di costruzione**. Tale contabilizzazione è avvenuta avvalendosi di una metodologia **base** che, come visto in precedenza nella "Parte 2", consta di sette differenti step atti ad indentificare dapprima le tipologie di mezzo impiegate, per poi procedere al calcolo dei quantitativi di materiale da portare in cantiere, i numeri di viaggi necessari per il trasporto e infine le distanze che corrono tra il singolo sito di produzione e il sito di costruzione del manufatto architettonico a cui corrisponderanno un valore di kgCO₂eq.

Si tiene a precisare che, seppur all'interno di questa fase si disponesse di informazioni puntali sulle distanze da percorrere per la rendicontazione della fase A4, si è decisi in ogni modo di procedere, per **coerenza** di calcolo, con una contabilizzazione ottenuta da metodo base, prevedendo perciò di differenziare le distanze da percorrere in accordo con quanto

promosso dal *RICS*, ovvero differenziando i km di strada da percorrere secondo quattro differenti scenari: lo scenario locale (50 km di distanza), quello nazionale (300 km) e quello europeo (1.500 km) o globale (20.000 km).

In particolar modo, nel caso della *BioCasa Sarotto*, il calcolo puntuale delle distanze ha evidenziato la necessità di suddividere tali percorsi secondo solo **due** differenti scenari, ossia quello locale e quello nazionale.

Ritornando invece alla metodologia di calcolo, una volta desunti i consumi specifici dei diversi mezzi impiegati (*F*) ed aver individuato il corrispondente valore di emissione specifica (*gW*), per la cui trattazione si invita a consultare il capitolo 6.3.1., è stato successivamente possibile procedere con la contabilizzazione del totale di *Embodied Carbon* associato alla fase di Trasporto A4.

Diseguito, si riporta dapprima uno *schema* riassuntivo circa l'operazione di semplificazione delle distanze percorse per l'arrivo in cantiere (Fig. 46), per poi invece presentare i valori suddivisi e cumulativi rispetto alla fase del ciclo di vita **A4** (Fig. 47). Per una trattazione completa della fase, si rimanda invece, alla consultazione dell'*Allegato 2*.

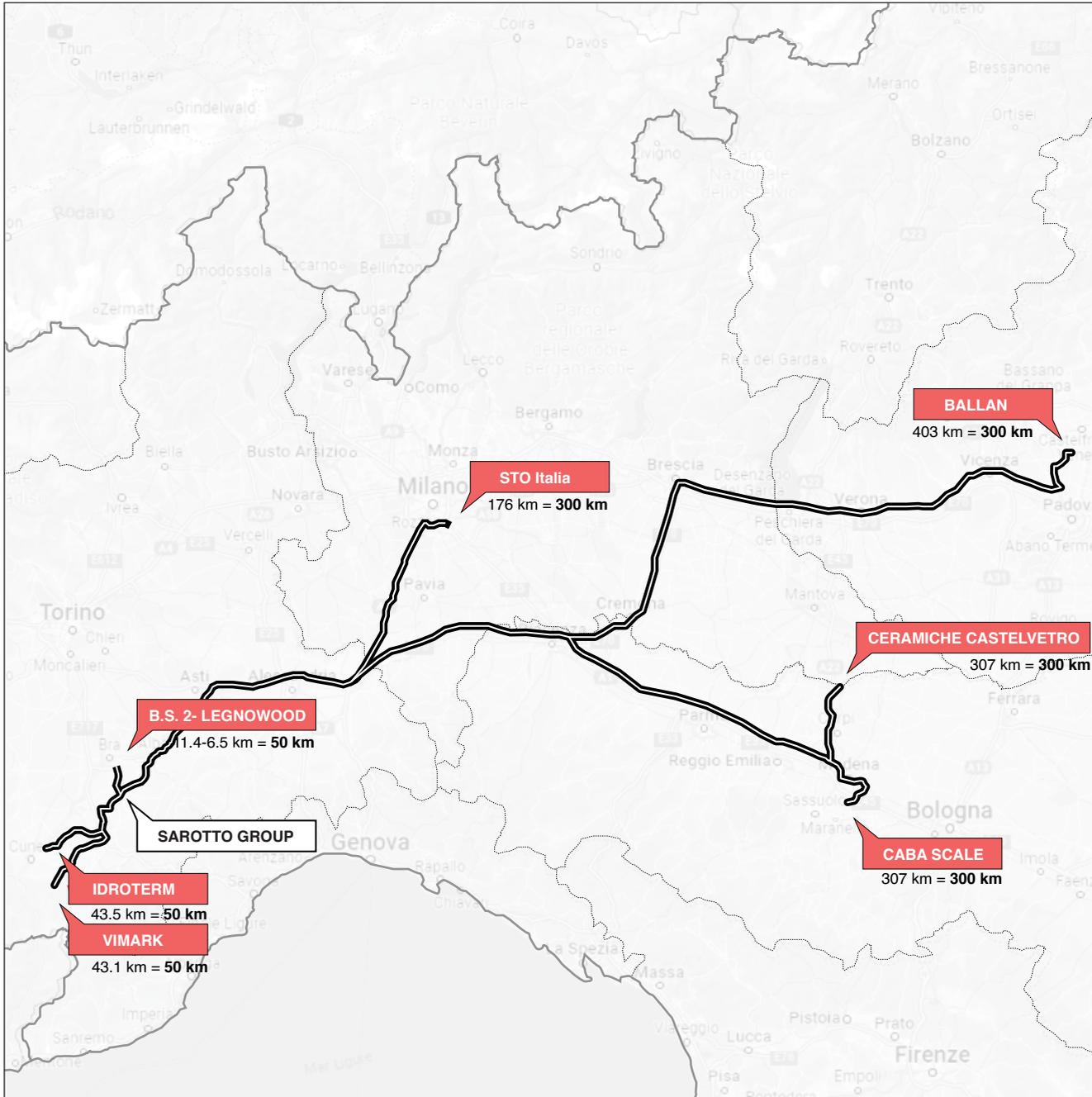


Fig.46 Visualizzazione dell'operazione di semplificazione sulle distanze dedotte per il calcolo della fase di Trasporto al cantiere (A4)

Elementi edilizi	EC A4 kgCO ₂ eq
Struttura portante	3 248.7
Pareti perimetrali (S32)	124.7
Pareti perimetrali (S24)	42.8
Pareti interne (S9)	32.1
Solaio controterra	264.1
Solaio interpiano	134.1
Solaio di copertura	88.0
Infissi esterni	28.4
Corpo scala	21.4
Porte	115.2
Grondaia	0.2

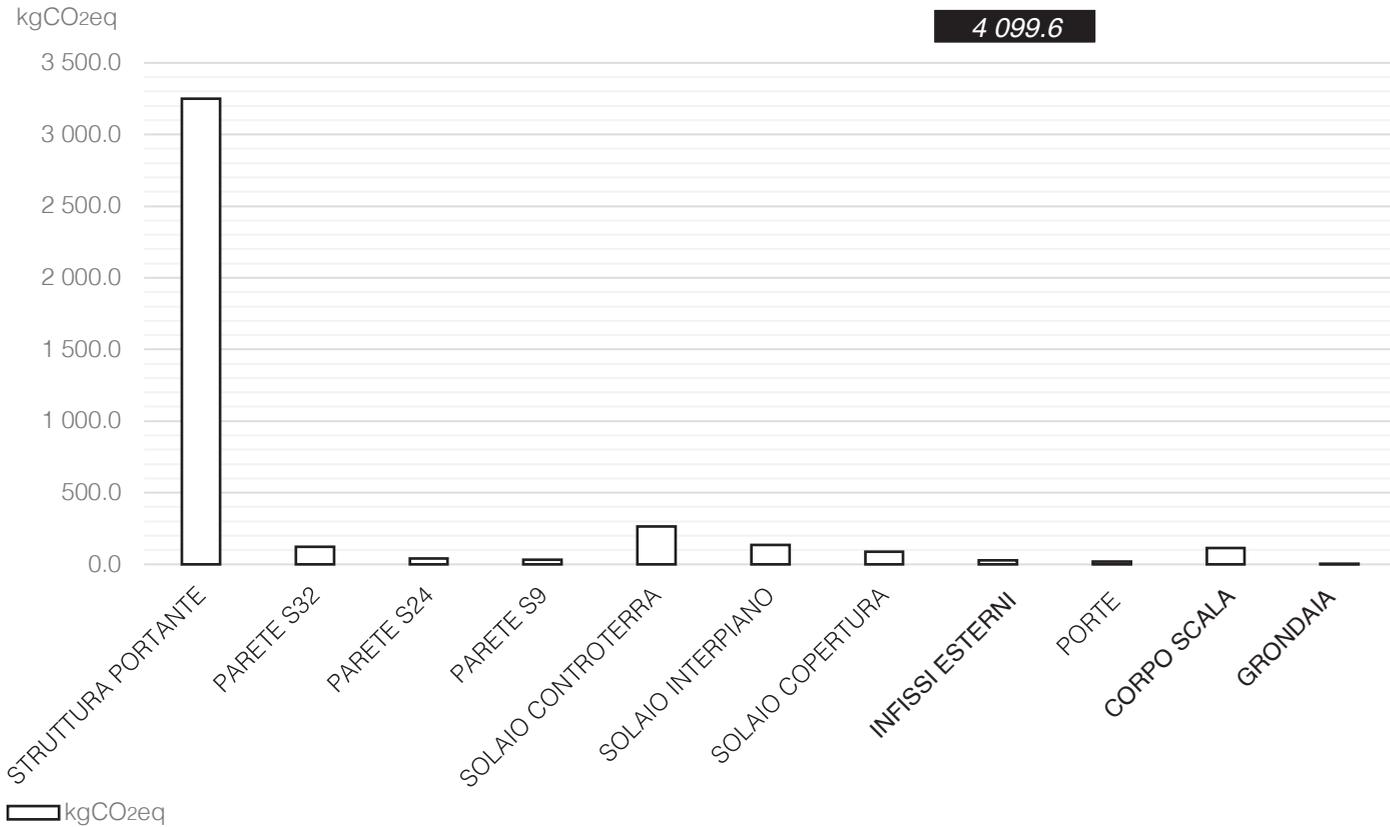


Fig.47 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fase A4 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A4	4 099.6	EC A4	0.41

10.2.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI COSTRUZIONE (A5)

Per la contabilizzazione della fase A5, si è proceduto con l'utilizzo di **dati generici** che hanno permesso la contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica relative all'impiego di un generico mezzo di costruzione.

Nel dettaglio, i dati generici impiegati fanno capo ai fogli di calcolo "SCAB" che, come visto all'interno del capitolo 6.3.2., permettono la valutazione delle emissioni di CO₂ e di CH₄ conseguenti alla generica prestazione di un dato mezzo *off-roads*. Si specifica inoltre che, le emissioni di metano individuate saranno poi aggregate all'emissioni di anidride carbonica tramite un'ovvia operazione di **conversione**, in modo da poter contabilizzare e individuare il quantitativo finale di *Embodied Carbon* afferente alla fase del ciclo di vita A5.

Infine, si ricorda di come l'individuazione di tali mezzi *off-roads* sia avvenuta di concerto con l'impresa edile, la quale ha fornito i principali mezzi impiegati per la realizzazione e il sollevamento dei fondamentali elementi tecnici costituenti il manufatto.

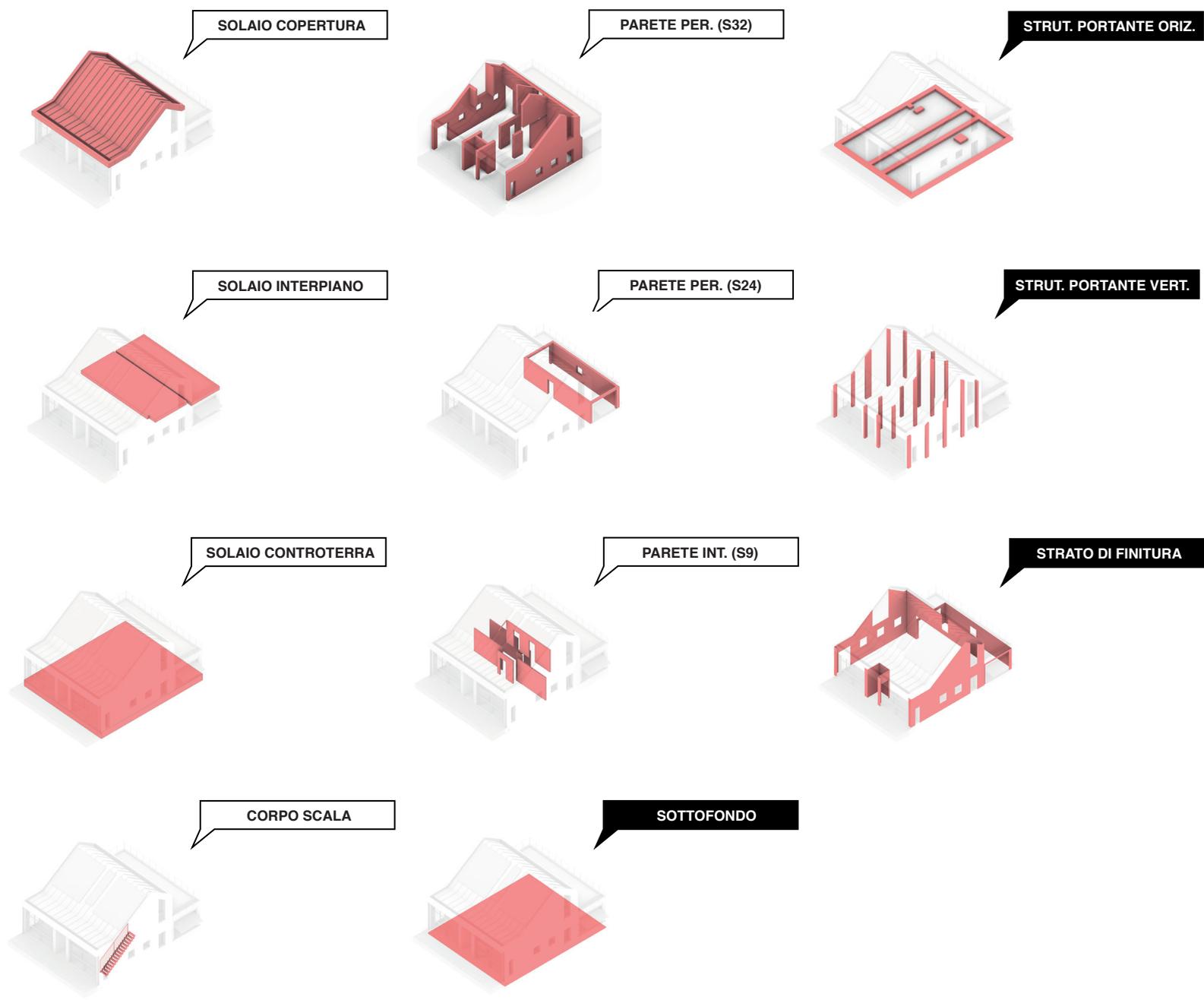
All'interno di questa analisi, perciò, rientrano sia le emissioni di anidride carbonica connesse con la realizzazione degli elementi tecnici **gettati in opera** (come fondazioni, pilastri e strato di finitura esterno), i quali sono

stati realizzati attraverso l'impiego di miscelatore, sia le emissioni riguardanti invece il sollevamento degli elementi **prefabbricati** (quali solai, corpo scala e murature interne e perimetrali) i quali hanno invece visto l'impiego di un'autogrù.

Una volta perciò individuata la produzione oraria generica dei mezzi impiegati, è stato possibile dapprima calcolare l'ammontare complessivo delle **ore** che hanno visto l'utilizzo o di miscelatore o di autogrù e infine tradurre queste ore (tramite i già citati fogli "SCAB") in quantitativo di **emissioni** di anidride carbonica equivalente che, per aggregazione, hanno poi permesso la contabilizzazione dell'*Embodied Carbon* all'interno della fase di Costruzione A5.

Come visto in precedenza, per la condivisione dei dati di *Embodied Carbon*, si mostra di seguito uno schema riassuntivo per visualizzare in maniera **intuitiva** gli elementi edilizi e i mezzi *off-roads* contemplati all'interno di questa fase (Fig. 48), per poi mostrare successivamente i valori suddivisi e cumulativi in merito alla EC_{A5} (Fig. 49).

Per una più completa e dettagliata consultazione del procedimento adottato in questa fase si invita a consultare invece nello specifico l'*Allegato 3*.



Impiego di autogrù
 Impiego di miscelatore

Fig.48 Suddivisione degli elementi edilizi e dei mezzi off-roads contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon della fase A5

Elementi edilizi	kgCO ₂ eq
<i>Solaio di copertura</i>	1 962.13
<i>Solaio interpiano</i>	208.89
<i>Solaio controterra (escluse fondazioni)</i>	306.91
<i>Corpo scala</i>	292.85
<i>Pareti perimetrali S32</i>	1 502.93
<i>Pareti perimetrali S24</i>	437.33
<i>Pareti interne S9</i>	498.17
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	6.77
<i>Struttura portante orizzontale</i>	24.13
<i>Struttura portante verticale</i>	2.77
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1.09

5 244

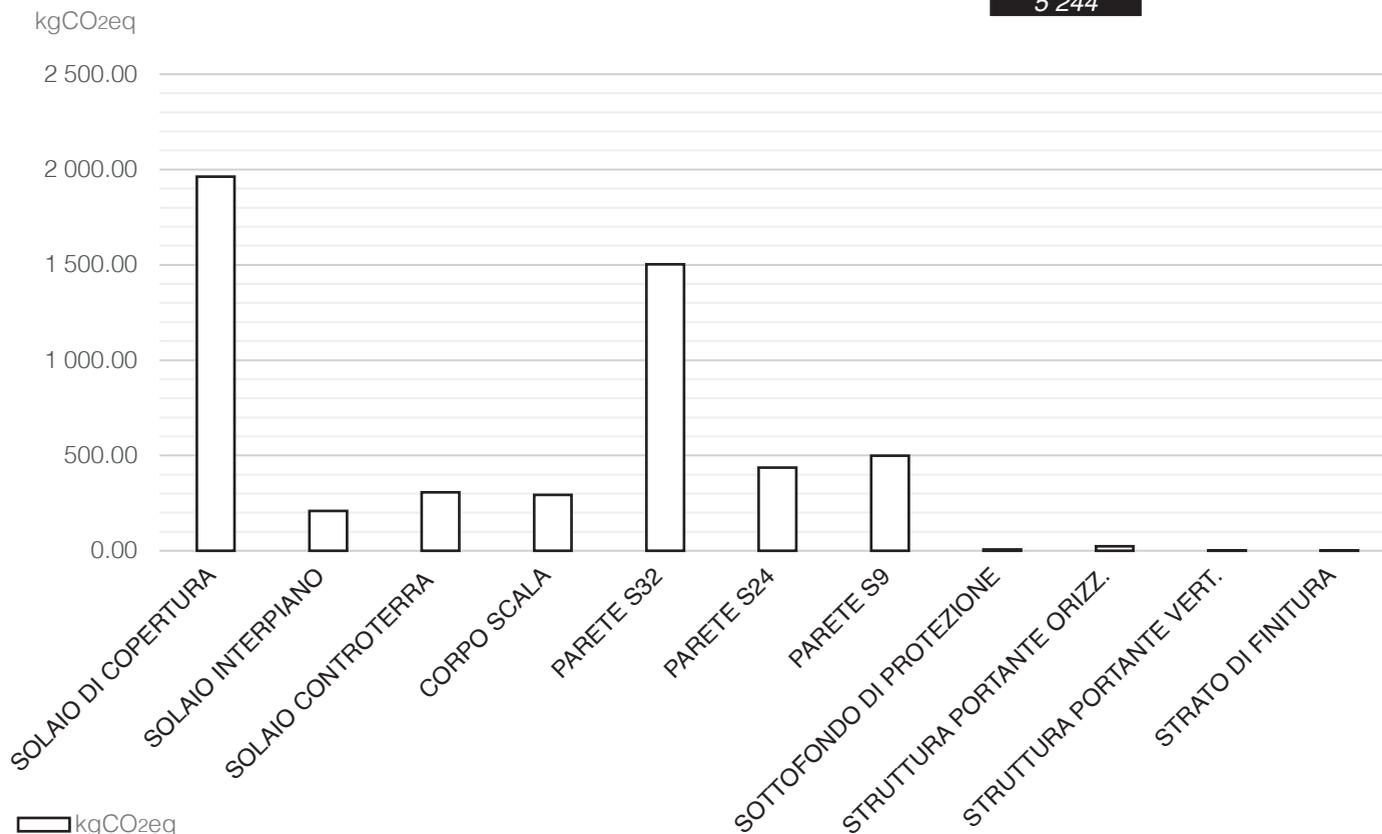


Fig.49 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase A5 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A5	5 244.0	EC A5	0.53

10.3. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI USO (B1-B4)

10.3.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI USO (B1)

All'interno di questa fase, si procede alla contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica prodotta o assorbita dall'utilizzo di determinati elementi tecnici o materiali.

Nel dettaglio, all'interno di questa procedura si è deciso di contabilizzare, per il manufatto architettonico in esame, **l'assorbimento** di CO₂ effettuato nella fase B1 dagli elementi tecnici in calcestruzzo (sia a livello di struttura portante orizzontale e verticale che per gli strati portanti dei principali elementi tecnici quali pareti opache verticali e solai). Oltre questi elementi tecnici, sono stati contabilizzati anche tutti gli assorbimenti associati allo strato di finitura superficiale interno e esterno che, come riportato dalle documentazioni condivise dalla "Sarotto Group", è realizzato in intonaco di calce (contenendo perciò una percentuale di cemento al suo interno).

Sostanzialmente quindi, in totale conformità con le procedure **base** presentate all'interno della trattazione teorica (capitolo 6.4.1.), in questa fase sono state contabilizzate le quantità di CO₂ stoccate per mezzo del processo di carbonatazione dagli elementi

a base cementizia. Si ricorda infatti, che attraverso questa reazione di carbonatazione, o se si preferisce di "presa" dell'anidride carbonica (*Carbon Uptake*), gli elementi cementizi contribuiscono allo **stoccaggio** della CO₂ presente nell'aria contigua agli elementi stessi. Infatti, l'anidride carbonica (CO₂) tramite la penetrazione nei pori caratteristici degli elementi a base cemento, entra a contatto con l'idrossido di calcio (Ca(OH)₂) producendo di conseguenza carbonato di calcio (CaCO₃) e acqua (H₂O).

Per la contabilizzazione di tale apporto "stoccato" dagli elementi cementizi, come già spesso ricordato, è stata fondamentale la consultazione del report prodotto nel 2022 dalla GBC Italia. La stessa procedura metodologica però, nel momento della sua applicazione pratica, ha mostrato alcune **limitazioni**, le quali sono riportate di seguito.

Dapprima si specifica che, la procedura risultava particolarmente carente nella possibilità di **caratterizzare** in maniera puntuale e specifica la contabilizzazione della CO₂ assorbita da tutti quegli elementi cementizi che, seppur rivestiti ad esempio da pannellature in cartongesso oppure retrostanti ad elementi o strati di isolamento (come potrebbe essere nel caso di un generico massetto in calcestruzzo), contribuiscono lo stesso allo stoccaggio della CO₂ presente in atmosfera.

Tale mancanza ha quindi giustificato da parte del valutatore (e in accordo con i relatori) alcune **supposizioni** puntuali in merito al grado di carbonatazione di alcuni elementi (ad esempio degli elementi in calcestruzzo delle pareti verticali), con l'intento di rendere il più possibile completo il valore conclusivo di *Carbon Uptake* nella fase B1.

Si tiene a sottolineare, che la procedura di contabilizzazione della *Carbon Uptake* (CU_{B1}), in particolar modo per il metodo base, a volte risulta essere richiedente di definizioni specifiche (in merito, ad esempio, alla tipologia di cemento impiegato) che non sempre potrebbero essere note al valutatore in sede di progetto **preliminare**.

Di seguito, si mostrano i risultati conseguenti lo studio della *Carbon Uptake* (CU_{B1}) degli elementi cementizi in forma sia tabellare che grafica. Nel dettaglio, in Figura 50, sono mostrati tutti i parametri e le specifiche necessari alla contabilizzazione della CU in fase B1 mentre, in Figura 51, sono raccolti attraverso istogrammi i singoli ammontare di *Carbon Uptake*, il cui valore massimo si registra per l'unità tecnologica dello strato portante orizzontale in calcestruzzo gettato in opera.

	A	CLINKER	UTCC	k	t	DC	Cpi	CU B1
	m ²	%	kgCO ₂ /kg	mm/anno	anni	%	kg/m ³	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	205.0	80%	0.5	0.8	50.0	85%	250.0	3 740.5
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	205.0	80%	0.5	0.8	50.0	85%	250.0	3 740.5
<i>Struttura portante verticale in cls gettato in opera</i>	46.5	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	2 295.8
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (8cm)</i>	192.5	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	9 504.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (6cm)</i>	192.5	80%	0.5	0.8	50.0	43%	250.0	1 756.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S9) (9cm)</i>	65.0	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	3 209.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (7cm)</i>	56.0	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	2 764.9
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (6cm)</i>	56.0	80%	0.5	1.6	50.0	85%	250.0	2 043.6
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato (interp.) (4 cm)</i>	42.2	80%	0.5	1.6	50.0	85%	250.0	1 540.4
<i>Strato isolante in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	89.2	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	4 402.0
<i>Strato portante in soletta di cls prefabbricato (interp.) (6 cm)</i>	89.2	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	4 402.0
<i>Strato portante in soletta di cls prefabbricato (copert.) (6 cm)</i>	134.0	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	6 615.9
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	89.2	80%	0.5	2.3	50.0	20%	250.0	1 101.0
								-47 118.2

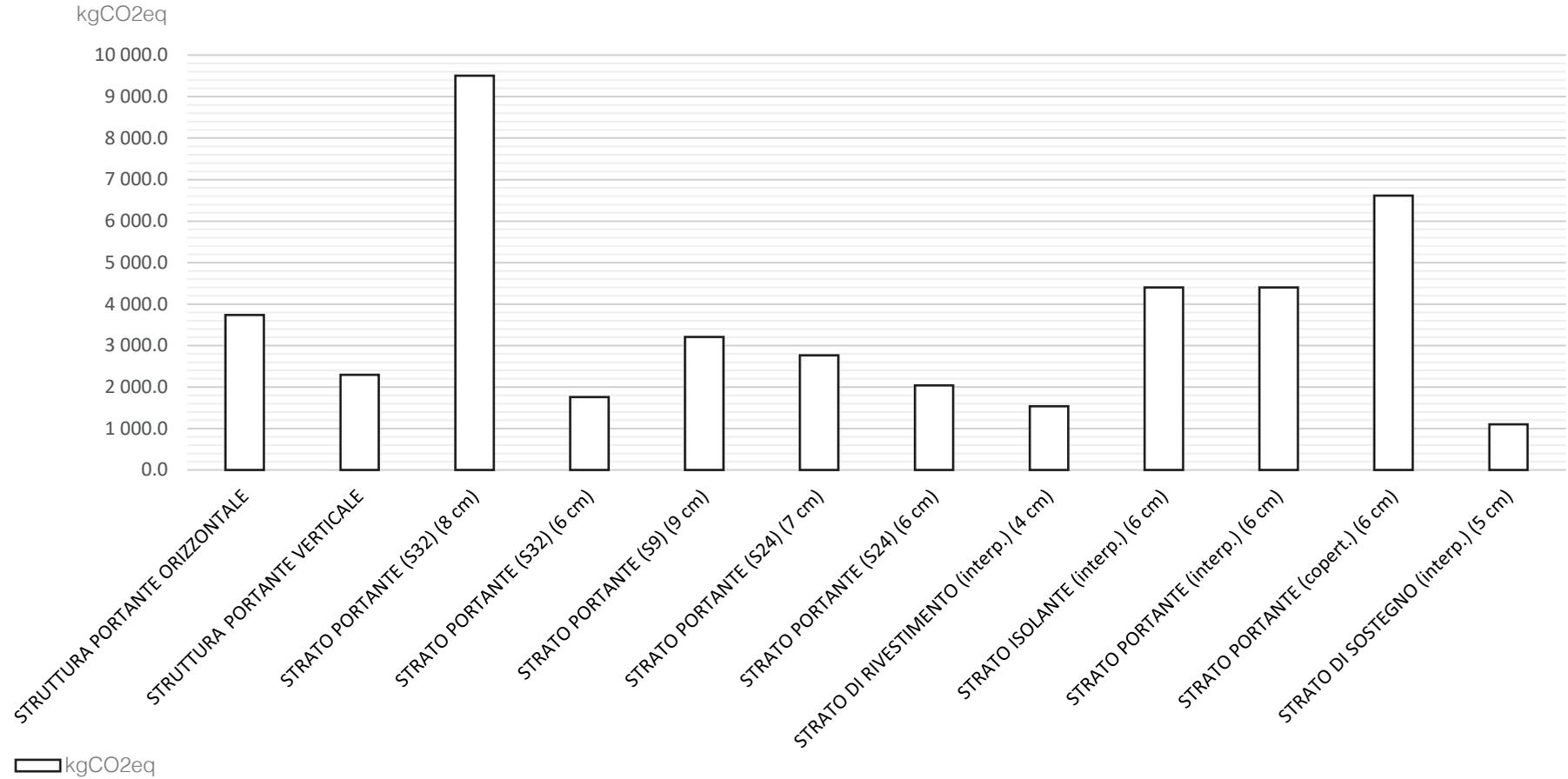


Fig.51 Suddivisione dei contributi di Carbon Uptake nella fase B1 secondo i principali elementi edilizi in via grafica

Successivo al calcolo della carbonatazione degli elementi cementizi all'interno di questa fase B1, si è proceduto alla contabilizzazione della CO₂ assorbita dagli strati di finitura in **intonaco di calce**, sia questi interni che esterni, prendendo come fonte di riferimento la procedura presentata nel corso del 2021 dalla *European Lime Association* (EULA).

Tale documento, dal nome *Calce come deposito naturale di carbonio* (EULA, 2021), propone infatti una procedura base per la contabilizzazione del CO₂ stoccata dagli elementi a base calce, il cui processo di carbonatazione risulta essere naturale dato che la calce, per la produzione di calcare, assorbe inevitabilmente CO₂ in atmosfera.

Tale procedura presa in esame, consiglia al valutatore di associare alla calce una capacità media di assorbimento della CO₂ in atmosfera, tramite carbonatazione, pari al 33% del 66% delle emissioni contabilizzate all'interno delle fasi di produzione A1-A3; questo poiché solo il 66% delle emissioni prodotte durante la fase A1-A3 è a capo del processo di **produzione** della calce. Infatti, come precisa il documento, il restante 1/3 di emissioni è conseguente ai processi di combustione, i quali contributi in termini di carbonio possono essere ridotti drasticamente attraverso, ad esempio, l'adozione di fonti energetiche rinnovabili;

contrariamente alle emissioni di processo le quali invece risultano essere inevitabili, poiché prodotte dalla reazione chimica della calce.

Nel dettaglio, all'interno di questo caso specifico, si è deciso di caratterizzare la calce impiegata con un tasso di carbonatazione pari al 33%, ovvero un tasso **medio** e generale poiché sprovvisti di informazioni specifiche sulla tipologia di intonaco utilizzato.

Infine, una volta concluse queste doverose premesse, si procede con la presentazione dei risultati inerenti la contabilizzazione della CO₂ assorbita dallo strato di finitura superficiale e il totale della *Carbon Uptake* (CU_{B1}) rendicontata, entrambi presentati nella tabella sottostante (Fig. 52).

	EC ₁ A1-A3 kgCO ₂ eq	EC ₂ A1-A3 kgCO ₂ eq	Perc. %	CU B1 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1 673.1	1 115.4	33%	368.1

Fig.52 Restituzione della carbonatazione contabilizzata all'interno della fase B1 per lo strato di finitura superficiale

Carbon Uptake	kgCO ₂ eq	Carbon Uptake	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
CU B1 (valore negativo)	-47 486.2	CU B1 (valore negativo)	-4.74

10.3.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI MANUTENZIONE (B2) E RIPARAZIONE (B3)

All'interno di questa sezione, si procede con la contabilizzazione dell'emissioni correlate alle azioni di manutenzione e riparazione che, come spiegato in precedenza, avverranno all'interno di un *range* di tempo stimato di 50 anni.

In particolar modo anche per questa fase, poiché **sprovvisi** di un piano di manutenzione programmato o di una guida alla manutenzione, si è deciso di procedere con la contabilizzazione della CO₂eq tramite un metodo base, prendendo come riferimento per la contabilizzazione dei valori generici relativi alle fasi B2 e B3 di un manufatto edilizio ad uso abitativo.

Tali valori, hanno permesso infatti la contabilizzazione dei kgCO₂eq afferenti le fasi B2 e B3, attraverso la **deduzione** sia di informazioni geometriche (ovvero il valore di m² di SLP di progetto), che di valori unitari di impatto (pari a 10 kgCO₂eq/m² per la fase B2) che, infine, di rapporto percentuale tra la fase

B2 e B3 (si tiene in considerazione che gli impatti ambientali in termini di carbonio della fase B3 siano pari al 25% dell'*Embodied Carbon* riscontrata all'interno della fase B2) (GBC Italia 2022d, p. 65).

Di seguito, si riportano i risultati suddivisi e congiunti per le fasi di Manutenzione e Sostituzione (B2-B3) (Fig. 53).

SLP	f	EC B2	EC B3 (25% B2)
m ²	kgCO ₂ eq/m ²	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
198.9	10.0	1 989.2	497.3

Fig.53 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fasi B2-B3

Embodied Carbon	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B2-B3	2 486.5	EC B2-B3	0.25

10.3.3. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI SOSTITUZIONE (B4)

All'interno di questa fase si contabilizzano, naturalmente in termini di CO₂eq prodotta, gli interventi di sostituzione di determinati elementi tecnici o materiali che, per necessità legate all'**obsolescenza** degli stessi, richiedono una completa rimozione ed una nuova installazione. In particolar modo, per la decisione in merito alle tempistiche di sostituzione, sono state consultate diverse fonti fra tutte il database di *Eureca*, il quale poi ha permesso la stima del "replacement factor" (come descritto all'interno del capitolo 6.4.3.).

Inoltre, per la stima dell'*Embodied Carbon* della fase B4, ai valori afferenti alla fase di produzione, trasporto e costruzione delle nuove componenti (ovvero fasi A1-A5), si presenteranno anche i valori di emissioni derivanti le fasi del ciclo di vita C2-C4; al fine di contabilizzare le emissioni di anidride carbonica dovute alla demolizione, al trasporto e allo smaltimento dei rifiuti prodotti durante le azioni di sostituzione. Poiché tali processi di smaltimento (C3-C4), come si vedrà più avanti, sono differenziati dalla caratterizzazione di due diversi scenari di smaltimento (scenario 100% e scenario 70-30%), si è deciso di riportare tali **differenze** di valori anche all'interno della contabilizzazione di questa fase, riportando così due diversi valori di EC_{B4}, al fine di caratterizzare

(seppur in minima parte) il calcolo e la restituzione dei risultati della fase B4. Si ricorda inoltre che, come da prassi per la metodologia base, mentre per la contabilizzazione dell'*Embodied Carbon* delle fasi A1-A5 saranno presi in considerazione i kg di materiali derivanti dalla *Bill of Quantities*, per le fasi del ciclo di vita C2-C4 saranno presi in esame i valori di *Design as built*; tale distinzione risulta infatti fondamentale al fine di non compromettere più del dovuto la veridicità del calcolo.

Infine, come si può vedere a Fig. 54, per tale fase sono state conteggiate **otto** diverse tipologie di elementi tecnici, ovvero: lo strato di finitura superficiale interno e esterno, il serramento e l'elemento soglia propri degli infissi, la pannellatura in vetro, le schermature solari, le porte sia interne che esterne (ovvero garage) e infine il sistema di protezione (parapetto). Nel dettaglio, si ricorda che per lo strato di finitura superficiale si è conteggiato, in ogni azione di "replacement", non il totale dello strato bensì la sua metà in termini di peso, poiché si presuppone che una sua completa eliminazione durante ogni fase di sostituzione sarebbe poco consigliabile, oltre che poco **credibile**. Di seguito, si procede con una trattazione estremamente sintetica per l'*Embodied Carbon* della fase B4, i cui risultati sono stati restituiti a seconda dei due diversi scenari individuati (Fig. 57). Per una trattazione completa si rimanda invece all'*Allegato 4*.

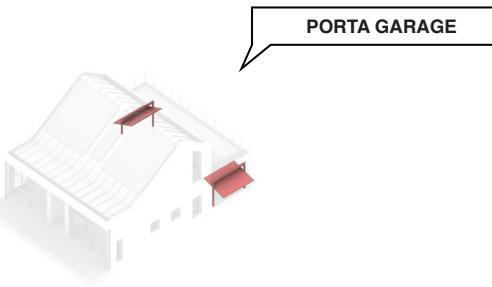
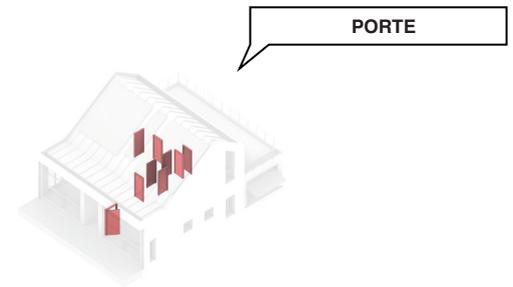
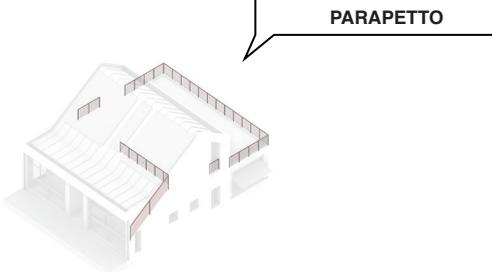
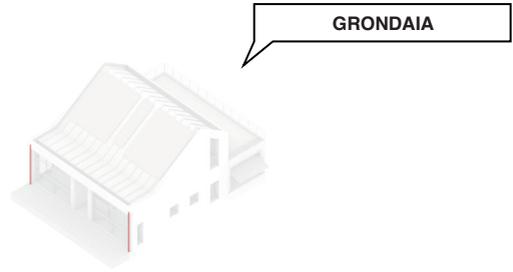
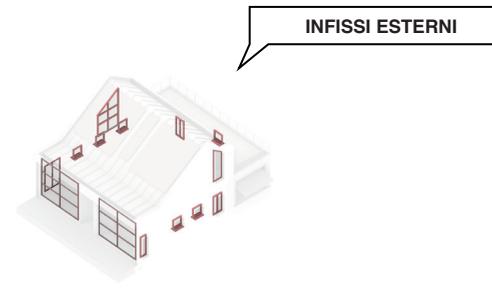


Fig.54 Suddivisione degli elementi edilizi contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon della fase B4

Elementi edilizi	STR	MEL-j	RF _{B4-j}	RF _{B4-j cor.}
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	50.0	10.0	4.0	4.0
<i>Infissi esterni</i>	50.0	25.0	1.0	1.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	50.0	20.0	1.5	2.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	50.0	20.0	1.5	2.0
<i>Porte interne in legno</i>	50.0	20.0	1.5	2.0
<i>Porta garage in acciaio</i>	50.0	25.0	1.0	1.0

Fig.55 Restituzione del “replacement factor” per la sostituzione degli elementi edilizi contemplati

Elementi edilizi	EC B4 S1 kgCO ₂ eq	Elementi edilizi	EC B4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1 757.8	<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1 575.8
<i>Infissi esterni</i>	4 931.2	<i>Infissi esterni</i>	4 931.3
<i>Grondaia in alluminio</i>	131.0	<i>Grondaia in alluminio</i>	131.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	3 568.5	<i>Parapetto in acciaio</i>	3 568.5
<i>Porte interne in legno</i>	1 403.2	<i>Porte interne in legno</i>	1 389.1
<i>Porta garage in acciaio</i>	515.7	<i>Porta garage in acciaio</i>	515.7
	12 307.4		12 293.4

Fig. 56 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase B4 secondo i due scenari considerati

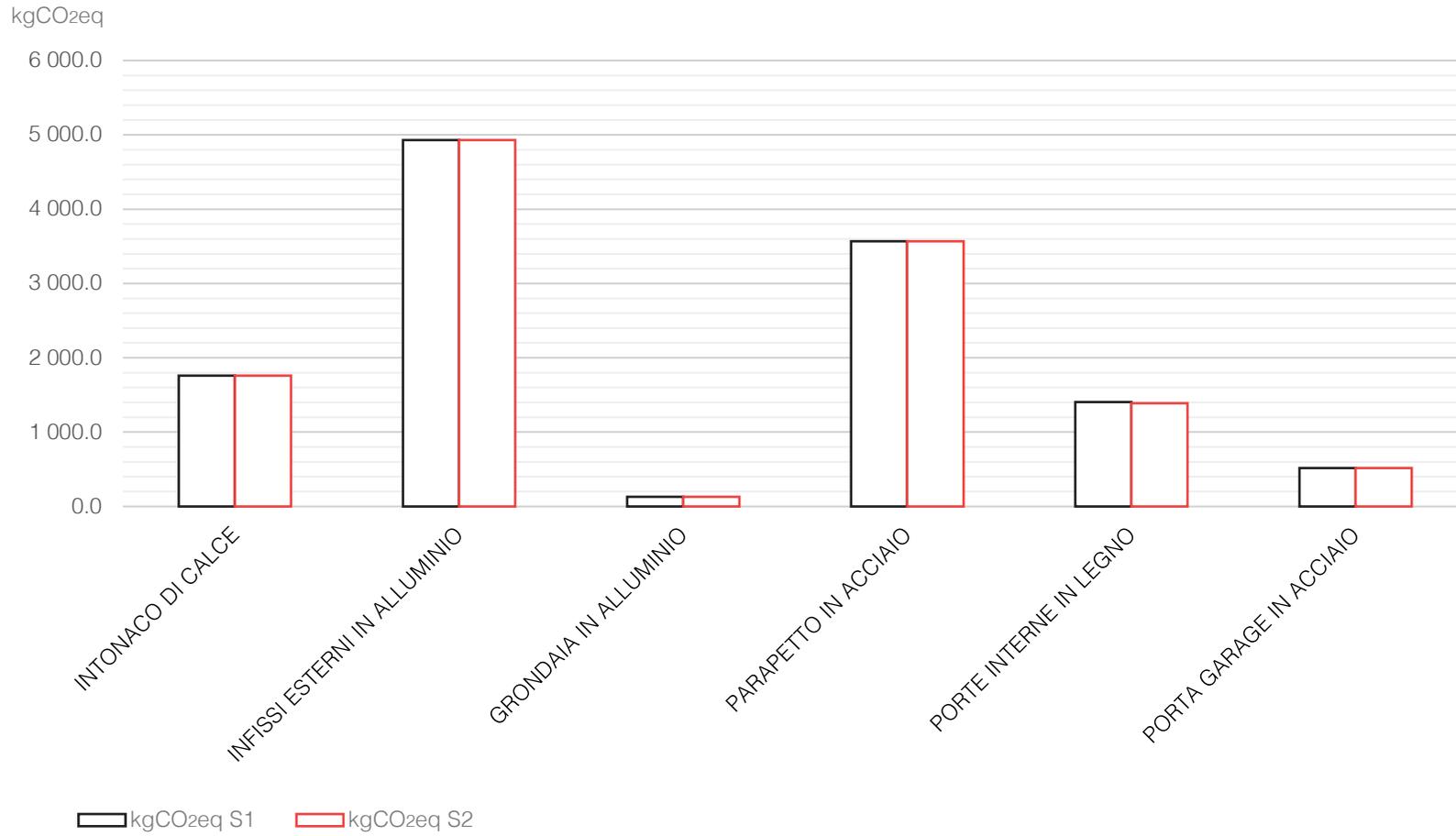


Fig.57 Comparazione secondo i due scenari di smaltimento dei contributi di Embodied Carbon dei principali elementi edilizi individuati

Embodied Carbon (S2 70-30%)	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon (S2 70-30%) (kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B4	12 293.4	EC B4 1.24
Embodied Carbon (S1 100%)	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon (S1 100%) (kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B4	12 307.4	EC B4 1.24

10.4. CONTABILIZZAZIONE DELL'OPERATIONAL CARBON NELLA FASE DI USO (B6-B7)

Per la contabilizzazione della *Operational Carbon*, ovvero delle emissioni **conseguenti** ad un consumo energetico (in questo caso esclusivamente elettrico), è stata fondamentale la collaborazione con la ditta “*Sarotto Group*”, la quale ha condiviso con i diretti interessati i dati relativi ai consumi energetici dell’abitazione, sia per il servizio di climatizzazione che per quello di produzione di acqua calda sanitaria, suddividendo il soddisfacimento di tali consumi attraverso una produzione di energia elettrica sia da fonte rinnovabile che non rinnovabile.

Oltre questo, sempre la ditta, ha fornito dati in merito al quantitativo di energia elettrica che, una volta prodotta dall’impianto fotovoltaico e non consumata in loco, viene **esportata** verso la rete elettrica nazionale contribuendo in questo modo alla decarbonizzazione della rete pubblica.

Una volta perciò ottenuti dati in merito ai consumi energetici da fonte rinnovabile e no, e oltre ad aver ottenuto dati in merito all’energia elettrica esportata dall’abitazione, è stato possibile attraverso l’impiego di un “*carbon factor*”, rendicontare il totale delle emissioni di

anidride carbonica provenienti dalla fase B6 e B7.

Nel dettaglio, per la restituzione del *carbon factor*, si è deciso di operare una **distinzione** secondo tre date cardini ovvero il 2022 (data di cui si hanno i più recenti dati riguardanti all’ammontare del valore del “*carbon factor*” nazionale), il 2030 ed il 2050; al fine di restituire un quadro conclusivo di *Whole Life Carbon* in linea con quanto presentato all’interno della *roadmap* europea per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni.

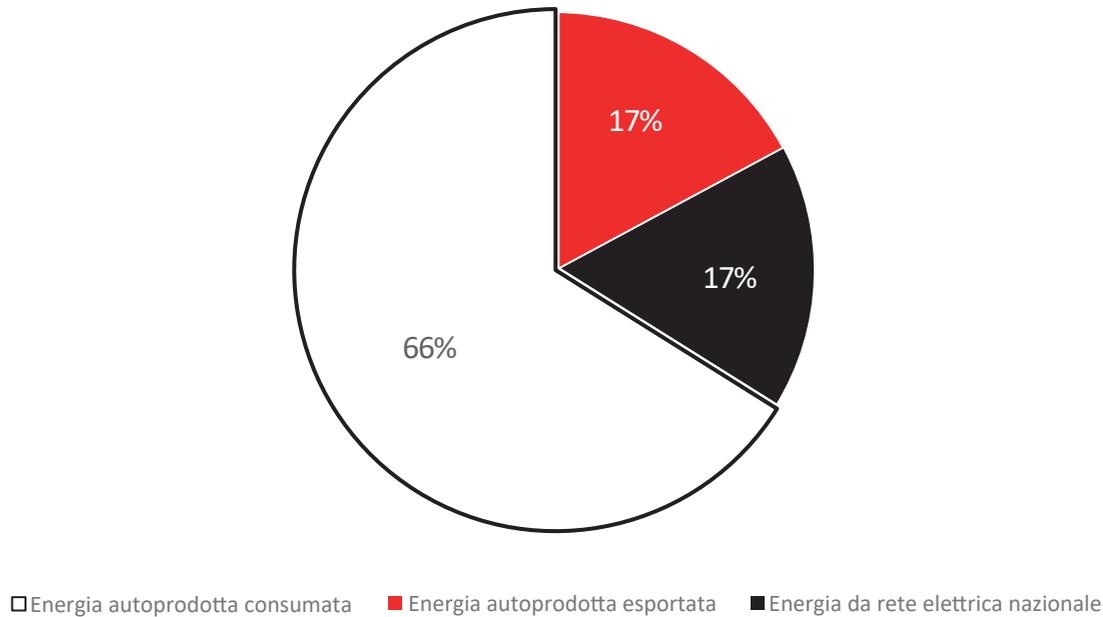
Inoltre, se per l’anno attuale si è preso in considerazione un fattore di conversione nazionale, desunto da dati ISPRA, per le successive due date si è deciso di impiegare come fonte di riferimento il database open source di *EnerData* (come già introdotto all’interno del capitolo teorico 6.5.); il quale restituisce uno scenario di decarbonizzazione della rete elettrica pubblica su scala europea fino al 2050.

Infine, si tiene a specificare che come presentato all’interno di alcuni report (su tutti il documento prodotto dal LETI), si è deciso di contabilizzare le emissioni di carbonio provenienti da energia elettrica autoprodotta ed esportata su rete pubblica come valore

negativo, intendendolo quindi come impatto di anidride carbonica evitato e perciò come contributo privato alla decarbonizzazione della rete elettrica nazionale.

Di seguito, si riporta dapprima un grafico a torta, il quale esplicita chiaramente i **contributi** in termini di energia autoprodotta consumata

ed esportata e quanta energia da rete elettrica sia richiesta durante la fase di operational dal manufatto (Fig.58). Successivamente invece sono riportati in Fig. 59 l'andamento del *carbon factor* nello scenario di decarbonizzazione (ENERdata 2023) ed infine i risultati dell'*Operational Carbon* atualizzati secondo il 2022, 2030 e 2050 (Fig. 60).



Dati energetici desunti da APE	kWh/anno	(kWh/m ²)/anno
Energia esportata	3 191.0	16.0
Impiego di Energia Non Rinnovabile	3 124.7	15.7
Impiego di Energia Rinnovabile	12 307.9	61.9

Fig.58 Suddivisione dei contributi energetici prodotti, esportati e consumati dal manufatto in forma sia tabellare che grafica

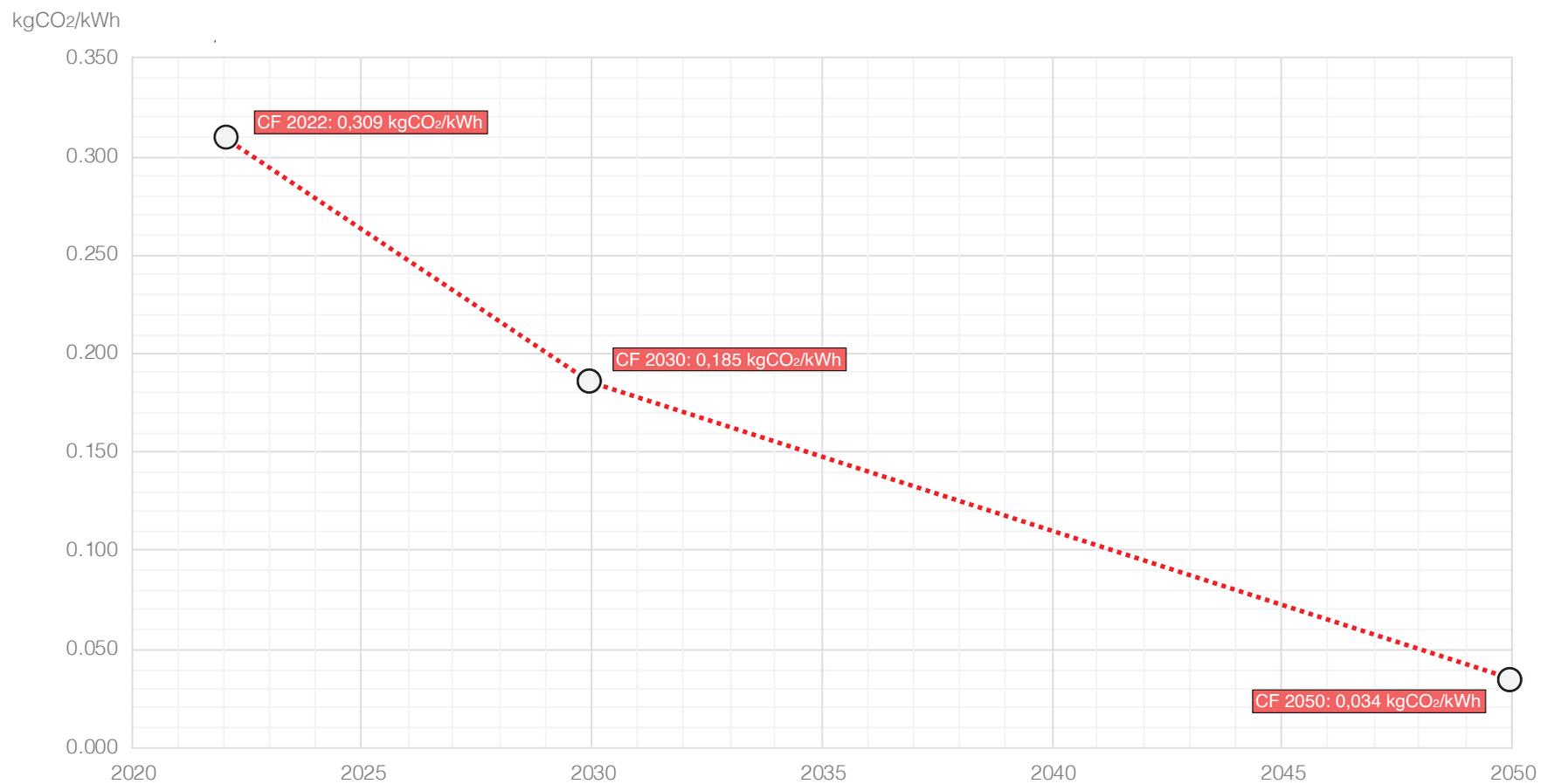


Fig.59 Andamento del Carbon Factor nel tempo (2022-2050)

ENERGIA DA RETE ELETTRICA NAZIONALE

ANNO	E _{agl} , nr kWh	f kgCO ₂ eq/kWh	OC kgCO ₂ eq/anno	OC/m ² /anno (kgCO ₂ eq)/m ² /anno
2022	3 124.7	0.309	965.5	4.9
2030	3 124.7	0.185	577.5	2.9
2050	3 124.7	0.034	106.9	0.5

ENERGIA ESPORTATA

ANNO	E _{agl} , nr kWh	f kgCO ₂ eq/kWh	OC kgCO ₂ eq/anno	OC/m ² /anno (kgCO ₂ eq)/m ² /anno
2022	3 191.0	0.309	986.0	-5.0
2030	3 191.0	0.185	589.7	-3.0
2050	3 191.0	0.034	109.2	-0.5

Fig.60 Conversione dei contributi energetici esportati e consumati dal manufatto durante le tre date cardini di riferimento

Operational Carbon 2022	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2022	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-20.5	EC B6-B7	-0.1
Operational Carbon 2030	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2030	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-12.2	EC B6-B7	-0.1
Operational Carbon 2050	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2050	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-2.3	EC B6-B7	0.0

10.5. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI FINE VITA (C1-C4)

10.5.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI DEMOLIZIONE (C1)

Per quanto concerne la contabilizzazione dei kgCO₂eq prodotti durante la fase di demolizione è stato necessario procedere con il calcolo delle **tre** diverse tipologie di demolizione prodotte e, conseguentemente, con le tre diverse tipologie di emissioni rilasciate in atmosfera.

Infatti, ciò che è stato compiuto in termini pratici all'interno della fase C1, è stato dapprima il calcolo del totale di rifiuti prodotti andando in questo modo a contabilizzare non solo il quantitativo di rifiuti prodotti durante l'ultimo anno del ciclo di vita del manufatto architettonico, ovvero la *Demolizione end of life* (DEoL), bensì anche **tutti** quei rifiuti riferiti alla fase di Costruzione (A5), definiti come rifiuti da *Demolizione preliminare* (DP), e per ultimo anche tutti quelli provenienti dalle fasi di manutenzione, riparazione e sostituzione, ovvero rifiuti da *Demolizione in fase d'Uso* (DU).

Infatti, ciò che è stato compiuto in termini pratici all'interno della fase C1, è stato dapprima il calcolo del totale di rifiuti prodotti andando in questo modo a contabilizzare non solo il quantitativo di rifiuti prodotti durante l'ultimo anno del ciclo di vita del manufatto architettonico, ovvero la *Demolizione end of life* (DEoL), bensì anche tutti quei rifiuti riferiti alla fase di Costruzione (A5), definiti come rifiuti da *Demolizione preliminare* (DP), e per ultimo anche tutti quelli provenienti dalle fasi di manutenzione, riparazione e sostituzione, ovvero rifiuti da *Demolizione in fase d'Uso* (DU).

Una volta perciò individuati i valori di peso delle suddette fasi di demolizioni, si è decisi di associare a questi quantitativi i valori di ECc₁ unitaria desunti, come detto in precedenza, dal database di *Ökobaudat*; in questo modo è stato possibile contabilizzare un valore **conclusivo** di *Embodied Carbon* per la fase C1.

Infine, si tiene a specificare che, data **l'assenza** di preesistenze all'interno del sito di costruzione, all'interno di questa fase si è deciso di assegnare un valore di nullo in termini di *Embodied Carbon* alla sottofase di *Demolizione*

preliminare (DP) e di proseguire con il calcolo solo della *Demolizione end of life* (DEoL) e della *Demolizione in fase d'Uso* (DU).

Di seguito, sono riportati in via del tutto sintetica i risultati di *Embodied Carbon* ottenuti all'interno della fase di Demolizione C1 (Fig. 61), per una più esaustiva trattazione si rimanda invece all'*Allegato 5*.

Materiali	EC C1DU	EC C1DEOL	EC C1
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
Struttura portante	0.0	63.5	63.5
Pareti perimetrali (S32)	14.0	75.7	89.8
Pareti perimetrali (S24)	6.4	20.4	26.8
Pareti interne (S9)	0.0	15.3	15.3
Solaio controterra	0.0	18.3	18.3
Solaio interpiano	10.7	25.3	36.0
Solaio di copertura	16.1	20.7	36.8
Infissi esterni	0.6	0.6	1.2
Corpo scala	0.0	0.2	0.2
			287.9

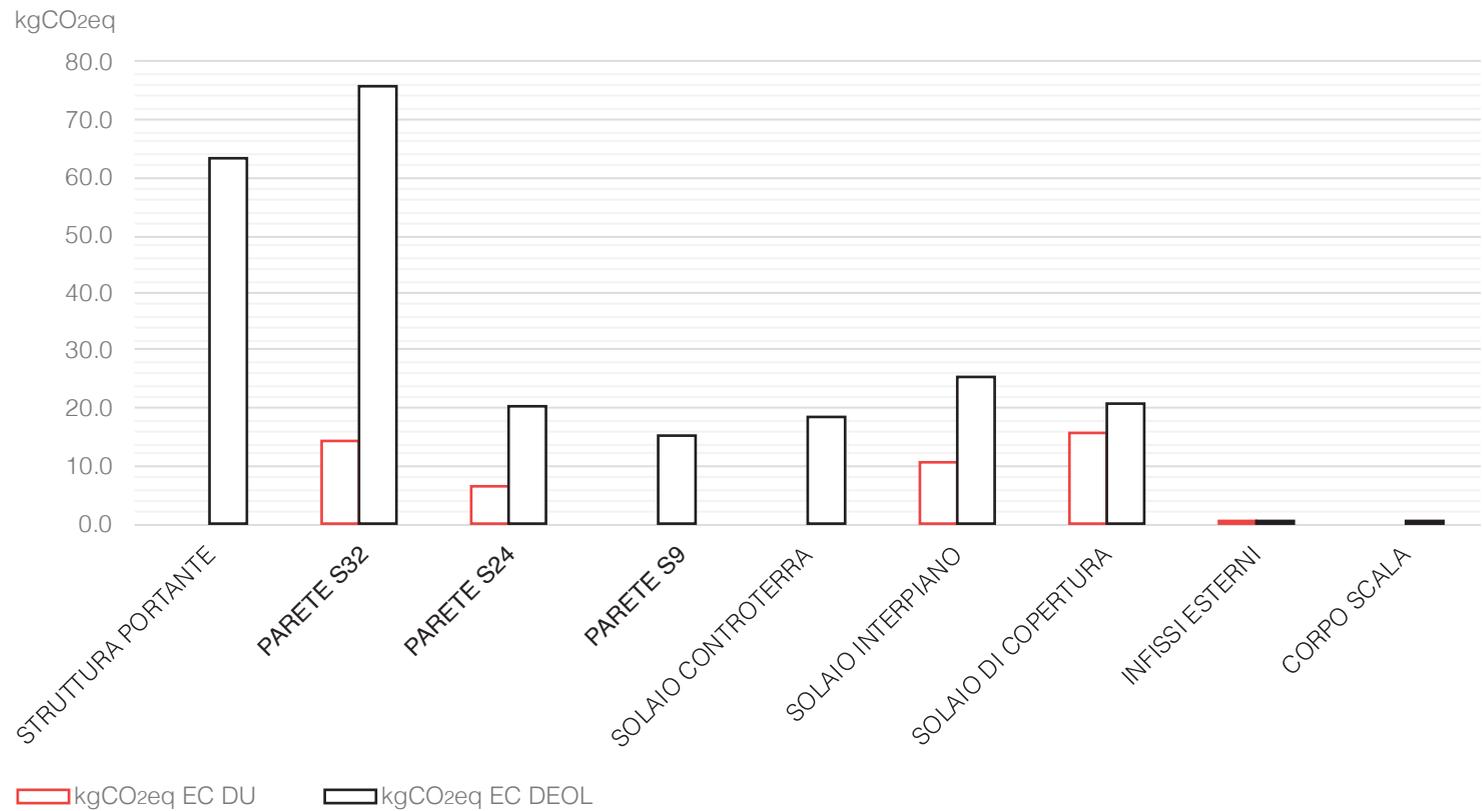


Fig.61 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase C1 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC C1	287.9	EC C1	0.03

10.5.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO DEI RIFIUTI (C2)

In questa fase, le emissioni di anidride carbonica contabilizzate seguono pedissequamente la stessa procedura di calcolo base presentata all'interno della fase A4 (capitolo 10.3.1.), andando esclusivamente a **variare** le distanze (espressi in km), percorse per il trasporto dei rifiuti individuati al sito di smaltimento, oltre che il quantitativo di **chilogrammi** di prodotto preso in considerazione (*Design as built*).

Infatti, per la fase C2, poiché sprovvisti di un piano concordato con la ditta, si è deciso di porre come scenario di trasporto uno scenario esclusivamente **locale**, ovvero una distanza tra il centro di smaltimento e il sito di costruzione pari a 50 km per ogni tipologia di materiale riscontrata all'interno del progetto.

Questa decisione, oltre a prevedere e “incoraggiare” uno scenario di smaltimento meno impattante possibile, è stata giustificata anche a seguito di un’attività di **ricerca**, la quale ha evidenziato una **massiccia** presenza sul territorio di siti di smaltimento adatti a tutte le tipologie di materiale riscontrate all'interno del progetto.

Di seguito, si riportano i risultati dell'Embodied Carbon nella fase di Trasporto (C2) in via del tutto sintetica (Fig 62).

Si ricorda infine che, gli stessi risultati, sono trattati in maniera ancor più dettagliata all'interno dell'*Allegato 6*.

Elementi edilizi	EC C2 kgCO ₂ eq
Struttura portante	3 094.0
Pareti perimetrali (S32)	98.6
Pareti perimetrali (S24)	41.4
Pareti interne (S9)	30.4
Solaio di copertura	69.4
Solaio interpiano	82.4
Solaio controterra	152.9
Infissi esterni	28.1
Corpo Scala	7.3
Porte	20.5
Grondaia	0.2

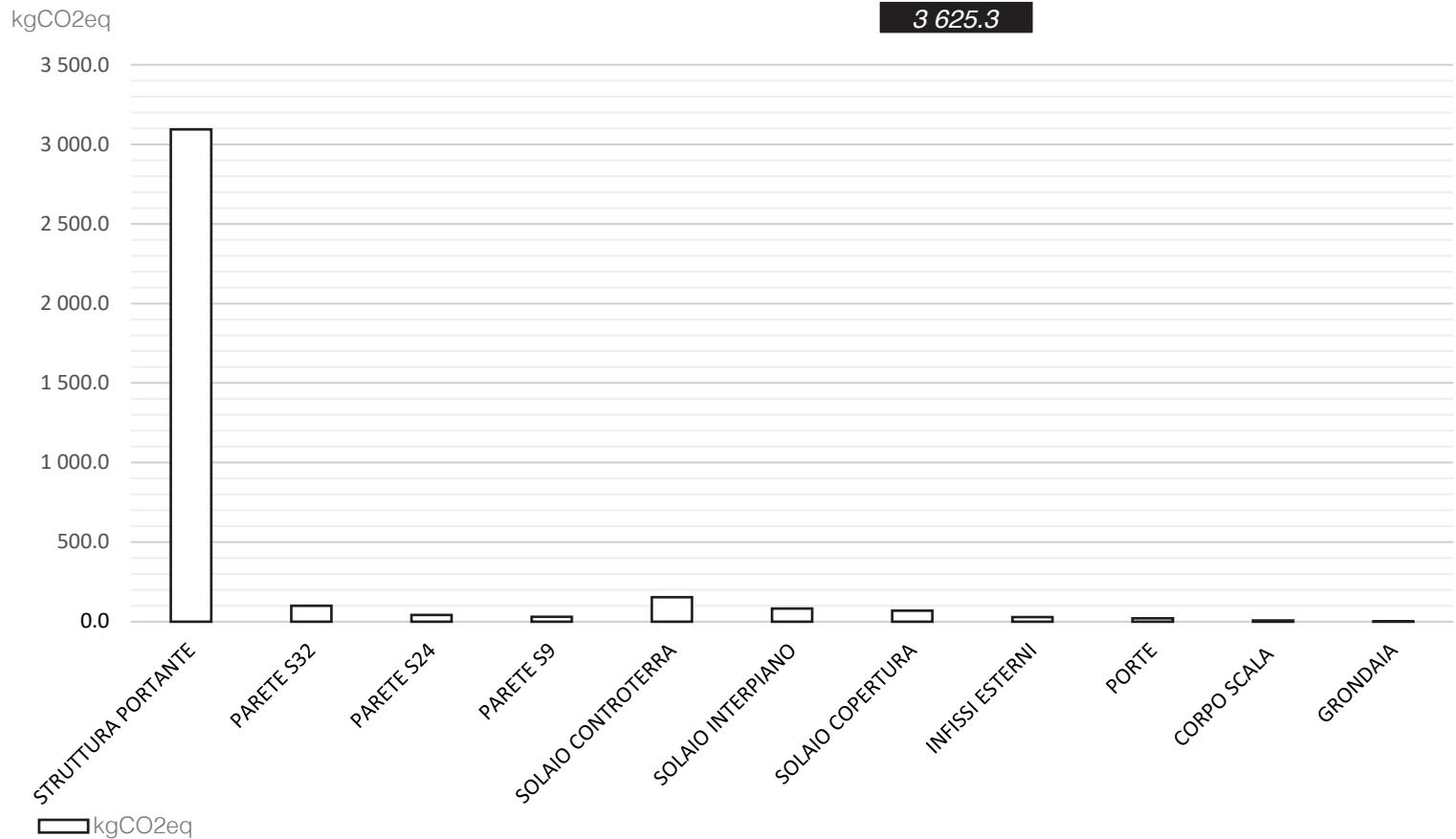


Fig.62 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase C2 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC C2	3 625.3	EC C2	0.36

10.5.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRATTAMENTO DEI RIFIUTI (C3) E SMALTIMENTO (C4)

All'interno di questa fase, si procede con la contabilizzazione dell'*Embodied Carbon* connessa con le procedure di trattamento dei rifiuti e del loro conseguente smaltimento. Si tiene a specificare che tale fase, essendo caratterizzata da **un'aleatorietà** dovuta dal suo concretizzarsi in un tempo *t* molto distante dal presente, non rappresenta le volontà dell'impresa edile, bensì solo delle deduzioni che fanno capo al tesista e ai suoi relatori.

Nel dettaglio, per la contabilizzazione delle emissioni di questa fase si è ritenuto opportuno procedere con la definizione di **due** differenti scenari per la gestione dei rifiuti, i quali differiscono per via dei diversi tassi di recupero dei rifiuti stessi. Infatti, il primo scenario prevede uno scenario in cui il 100% dei prodotti sia smaltito presso un centro di discarica senza alcun recupero di materiale o energia; il secondo, invece, presenta uno scenario 70-30% in cui si prevede che il 70% dei materiali sia sottoposto a processi di recupero o riciclo.

Si aggiunge poi, che tali **tassi** possono differire a seconda del materiale stesso, ad esempio, nel caso dell'alluminio o dell'acciaio (in accordo sia con le procedure odierne di riciclo che con le direttive europee per il recupero dei materiali) si è deciso di caratterizzare il riciclo

dei materiali con un percentuale pari al 90%, da cui ne consegue che solo il 10% sarà invece posto a discarica. Un ulteriore passo fondamentale, a fine di una completa contabilizzazione della fase C3 e C4, è stato il calcolo del totale dei **rifiuti** prodotti. Per questo motivo, come descritto all'interno del capitolo 6.6.3., all'interno di questa fase sono stati rendicontati non solo i "*Demolition waste*" (DW), bensì anche i "*Construction Waste*" (CW) e i "*Replacement Waste*" (RW), ai quali kg poi è corrisposto un valore espresso di kgCO₂eq desunto dal già citato foglio di calcolo *BEIS*, il quale assegna dei valori unitari di *Embodied Carbon* diversi a seconda della metodologia di smaltimento scelta (il foglio di calcolo *BEIS* è stato applicato per tutti i materiali che compongono il manufatto edilizio, eccezion fatta per i materiali a base legno i cui valori fanno capo alla *Carbon Sequestration* unitaria ipotizzata in fase A1-A3 e ai valori di emissioni mostrati all'interno della Tabella 32).

Di seguito, sono riportati in ordine i risultati di *Embodied Carbon* delle fasi C3-C4, in via del tutto sintetica, dai quali si può chiaramente evincere come i contributi maggiori siano prodotti dall'impiego degli elementi a base lignea (Fig. 63, 64). Per una loro più compiuta e puntuale analisi si rimanda alla consultazione dell'*Allegato 7*. **N.B. In rosso sono evidenziate le voci che non concorrono alla contabilizzazione della EC_{C3-C4} bensì della CS_{C3-C4}**

Elementi edilizi	EC C3-C4 S1 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	252.74
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato</i>	3.77
<i>Strato portante o di sostegno in cls prefabb.</i>	104.19
<i>Strato isolante in cls alleggerito</i>	5.64
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	7.84
<i>Strato di riv. interno in cartongesso</i>	271.04
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	10.43
<i>Strato di riv.sup. in ceramica</i>	7.08
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.</i>	2.06
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.73
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	2.20
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.03
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.30
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.12
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.92
<i>Porte interne in legno</i>	590.16
<i>Strato di sup. in legno</i>	904.59
<i>Corpo scala in acciaio</i>	0.32
<i>Porta garage in acciaio</i>	2.86
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.72
	673.0
	1 494.8

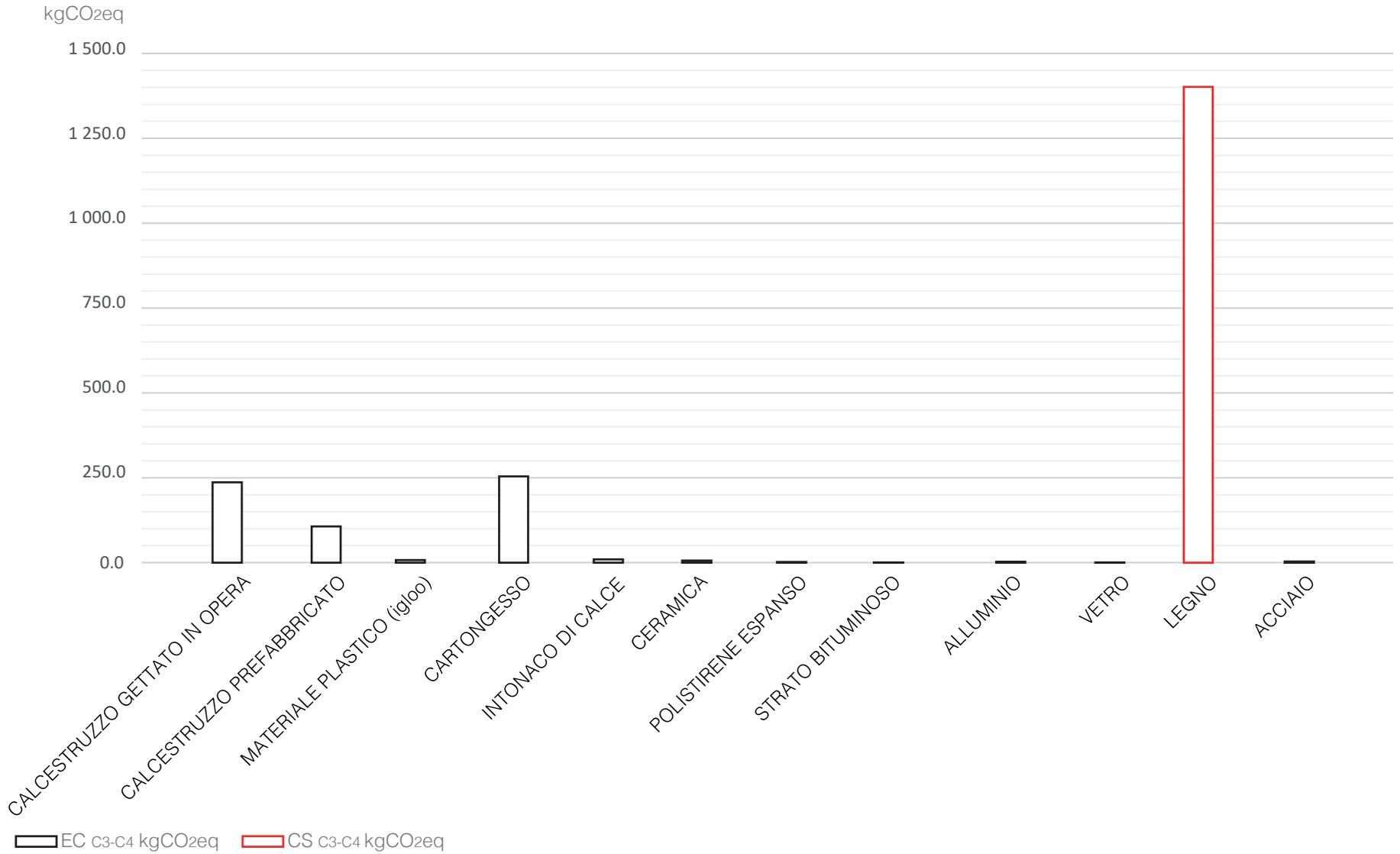


Fig.64 Suddivisione dei contributi di EC e CS nella fase C3-C4 secondo i principali materiali impiegati all'interno dello scenario S1 (100%) in via grafica 163

Elementi edilizi	EC C3-C4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	250.1
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato</i>	3.7
<i>Strato portante o di sostegno in cls prefabb.</i>	103.1
<i>Strato isolante in cls alleggerito</i>	5.6
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	15.5
<i>Strato di riv. interno in cartongesso</i>	137.4
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	10.3
<i>Strato di riv.sup. in ceramica</i>	7.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.</i>	2.0
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.7
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	2.2
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.3
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.1
<i>Pannellatura in vetro</i>	14.0
<i>Porte interne in legno</i>	-134.2
<i>Strato di sup. in legno</i>	-214.6
<i>Corpo scala in acciaio</i>	0.3
<i>Porta garage in acciaio</i>	2.8
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.7
	555.9
	-348.8

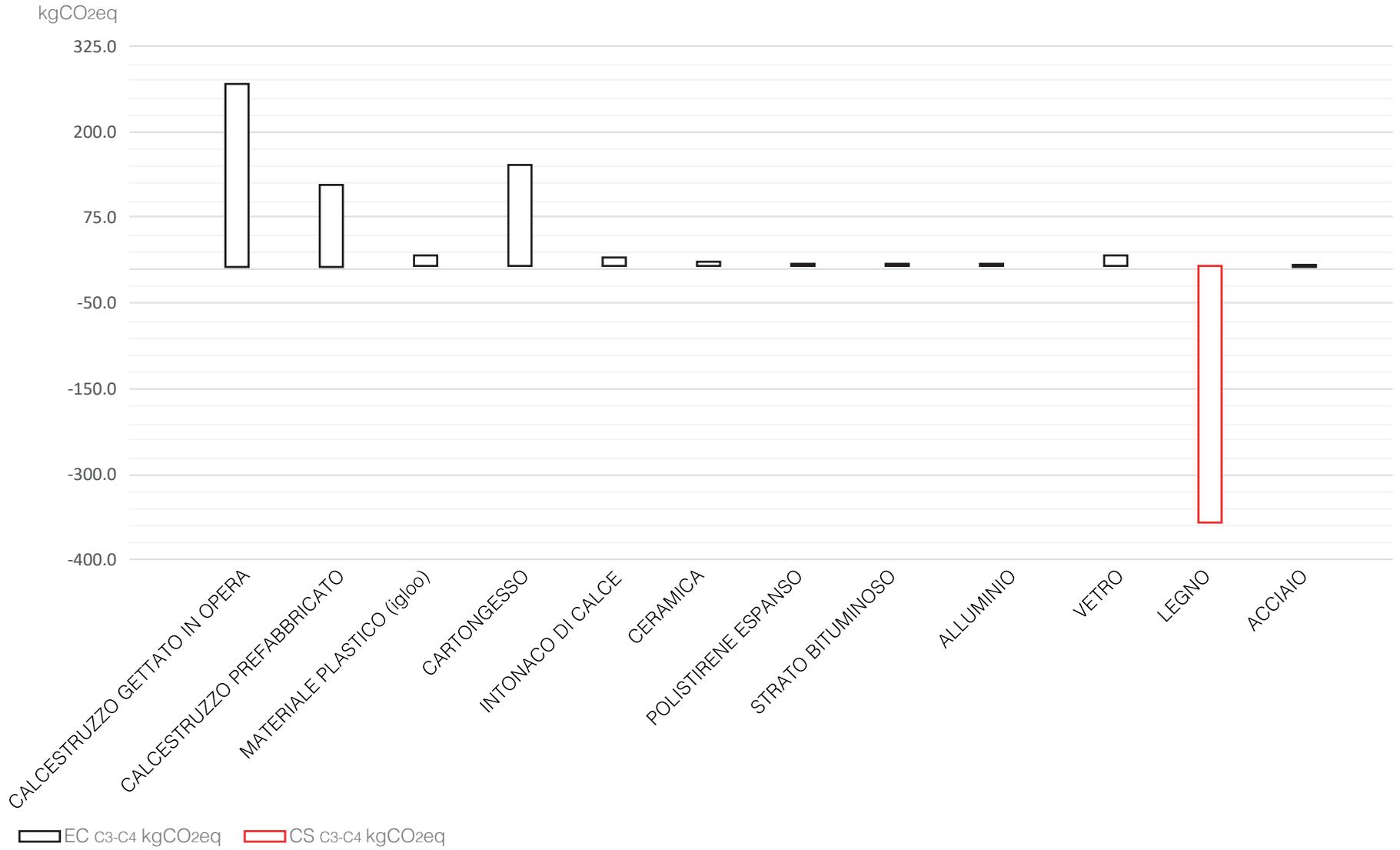


Fig.66 Suddivisione dei contributi di EC e CS nella fase C3-C4 secondo i principali materiali impiegati all'interno dello scenario S2 (70-30%) in via grafica 165

Inoltre, si specifica che all'interno di questa fase sono stati rendicontati anche i kg di CO₂ assorbiti dal processo di carbonatazione dei rifiuti a base **cemento**. Tale contabilizzazione è avvenuta attraverso una metodologia di base, che seppur molto simile rispetto a quella mostrata durante la fase di Uso B1, mostra al contempo alcune **differenze**. Infatti, poiché si suppone di considerare per gli elementi cementizi un periodo di carbonatazione ammissibile di 100 anni, tale contabilizzazione (a differenza di quella effettuata per la fase B1) risulta essere posta di 50 anni oltre allo scenario temporale di riferimento (che si ricorda essere di 50 anni).

Inoltre, seppur i parametri richiesti ai fini della contabilizzazione rimangono gli stessi di quelli richiesti per la CU_{B1}, la procedura di contabilizzazione della CU_{C3+C4} **differisce** nello svolgimento degli step. Infatti, ai fini del calcolo al valutatore è richiesto di conteggiare dapprima la carbonatazione di un singolo ipotetico **cubo** di calcestruzzo di dimensioni 30 x 30 mm, per poi calcolare il numero totale di cubi appartenenti ad ogni singolo elemento cementizio rilevato e di associare infine a questi il valore unitario di *Carbon Uptake* calcolata per il singolo cubo, in modo da restituire un valore complessivo di CU_{C3+C4} (GBC Italia 2022d, pp. 81-83).

A tale procedura, è poi seguita l'elaborazione di un **doppio** scenario di carbonatazione derivante dalla differenziazione effettuata nei confronti delle percentuali (100% e 30%) di rifiuti cementizi posti a discarica. Tali quantitativi di CO₂ assorbiti, poiché da intendersi come valori negativi di CO₂, saranno quindi nuovamente **decurtati** all'interno della

valutazione conclusiva di *Whole Life Carbon* sia nello scenario 100% che in quello 70-30%.

Infine, si ricorda, che data la carenza di alcune informazioni specifiche per la contabilizzazione della *Carbon Uptake* nella fase di demolizione C3-C4 e con l'intento di rendere il più credibile possibile il dato di *output*, all'interno di questa rendicontazione sono state numerose le **ipotesi** effettuate.

In primo luogo, infatti, si è ipotizzato di assegnare agli elementi cementizi un *Utcc* (ovvero un grado massimo di assorbimento teorico di anidride carbonica) **inferiore** rispetto a quello ipotizzato in sede di calcolo della fase B1, considerando in questo modo parzialmente saturo di carbonatazione l'elemento in esame.

In secondo luogo, si specifica che il fattore k (che indica la profondità annua della carbonatazione) rispetto alla fase B1 ha subito una variazione, dettata dalla diversa **esposizione** dei rifiuti in calcestruzzo. Infatti, se nella fase B1 era stato preso in considerazione un fattore k tipico per ambienti *indoor* o per strutture in calcestruzzo armato a contatto con il suolo, in questa fase C3-C4 è stato adottato un fattore k sempre pari a 1,6 mm/anno poiché, come spiegato da normativa, rappresentate la condizione di rifiuti cementizi esposti alla pioggia, condizione del tutto **simile** a quello che un rifiuto inerte potrebbe possedere all'interno di un generico sito di smaltimento.

In terzo luogo, l'ultima correzione effettuata è in merito allo **sconto** dei risultati ottenuti in sede di CU_{C3-C4} con i risultati riscontrati (dallo stesso elemento) in sede CU_{B1}.

Ovviamente, si specifica che, qualora l'elemento in esame **non** fosse stato considerato durante la carbonatazione nella fase di Uso (poiché espressamente richiesto dalla normativa) il risultato ottenuto in fase di demolizione non dovrà naturalmente essere scontato (come nel caso, ad esempio, di un massetto di sottofondo) (Fig. 67).

Ulteriori informazioni, circa le specifiche prese in esame per la deduzione della *Carbon Uptake* C3-C4 possono essere ritrovate all'interno dell'*Allegato 7*.

	CU C3-C4 S1 kgCO ₂ eq	CU B1 kgCO ₂ eq	CU C3-C4 S1 f. kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	97 128.2	3 740.5	93 387.7
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	346 344.9	3 740.5	342 604.4
<i>Struttura portante verticale in cls gettato in opera</i>	39 798.9	2 295.8	37 503.0
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (8cm)</i>	53 065.1	9 504.2	43 561.0
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (6cm)</i>	54 960.3	1 756.2	53 204.1
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S9) (9cm)</i>	23 926.7	3 209.2	20 717.5
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (7cm)</i>	14 213.9	2 764.9	11 449.0
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (6cm)</i>	14 687.7	2 043.6	12 644.1
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefab. (interp.) (4 cm)</i>	7 959.8	1 540.4	6 419.4
<i>Strato isolante in cls alleggerito (controt.) (6 cm)</i>	52 117.6	0.0	52 117.6
<i>Strato isolante in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	29 612.2	0.0	29 612.2
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (interp.) (6 cm)</i>	42 641.6	4 402.0	38 239.6
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (copert.) (6 cm)</i>	61 119.7	6 615.9	54 503.8
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	73 154.1	0.0	73 154.1
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (contr.) (5 cm)</i>	21 083.9	1 101.0	19 982.9
			-889 100.4
			CU C3-C4 S2 f. kgCO ₂ eq
Carbon Uptake C3-C4 (scenario 70-30%)			-266 730.1

Fig.67 Suddivisione dei contributi di Carbon Uptake nella fase C3-C4 secondo i principali elementi edilizi degli scenari S1 e S2

Emodied Carbon (S2 70-30%) EC C3-C4	kgCO ₂ eq 555.9	Emodied Carbon (S2 70-30%) EC C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 0.06
Emodied Carbon (S1 100%) EC C3-C4	kgCO ₂ eq 673.0	Emodied Carbon (S1 100%) EC C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 0.07
Carbon Uptake (S2 70-30%) Carbon Uptake C3-C4	kgCO ₂ eq -265 409.5	Carbon Uptake (S2 70-30%) Carbon Uptake C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -26.69
Carbon Uptake (S1 100%) Carbon Uptake C3-C4	kgCO ₂ eq -884 698.4	Carbon Uptake (S1 100%) Carbon Uptake C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -88.96
Carbon Sequestration (S2 70-30%) Carbon Sequestration C3-C4	kgCO ₂ eq -348.8	Carbon Sequestration (S2 70-30%) Carbon Sequestration C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -0.04
Carbon Sequestration (S1 100%) Carbon Sequestration C3-C4	kgCO ₂ eq 1 498.8	Carbon Sequestration (S1 100%) Carbon Sequestration C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 0.15

10.6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE OLTRE IL CICLO DI VITA (D)

Per quanto concerne la contabilizzazione effettuata all'interno della fase D, invece, si è ricercato di valutare, in maniera del tutto predittiva e sempre in termini **ambientali**, il potenziale grado di circolarità del manufatto edilizio realizzato dalla "Sarotto Group".

Per il conteggio e la rendicontazione di questa fase, (come già fatto in precedenza, ad esempio, per la fase A1-A3) sono stati impiegati nel dettaglio dei valori di EC_D desunti dal database della *Ökobaudat*, i quali hanno permesso di associare ai quantitativi di chilogrammi di prodotto predisposto a processi di **trattamento**, riciclo o recupero (decisi

all'interno delle fasi C3-C4) un valore unitario di *Embodied Carbon*.

Inoltre, si specifica che tali valori generici desunti dal *database* tedesco, fanno riferimento a tecnologie di trattamento squisitamente **contemporanee** e per questo motivo si considerano difficilmente riproponibili per l'anno in cui il manufatto edilizio sarà effettivamente demolito.

Ciononostante, si ritiene ugualmente interessante calcolare in via **predittiva** e parziale il livello di circolarità del manufatto e i potenziali benefici apportati da un riutilizzo e un recupero di materia prima seconda, al fine di poter poi successivamente andare a confrontare, con l'alternativa progettuale pensata, non solo i risultati di *WLC* ma anche i livelli di **circularità**

potenziali.

Infine, si tiene a ricordare che il valore in termini di $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ desunto da questa fase non concorrerà in nessun modo al valore conclusivo di *Whole Life Carbon* calcolato. Infatti, tale valore sarà riportato sempre in via separata, come espressamente richiesto e condiviso dalle due principali fonti metodologiche analizzate, ovvero: *GBCItalia* e *RICS*.

Di seguito si condividono in Fig. 68 i risultati ottenuti in fase di Circular Economy, i cui maggiori benefici sono rappresentati dalla remissione e dal recupero delle componenti in acciaio; mentre, per una più completa trattazione dell'argomento, si rimanda all'*Allegato 8*.

Elementi edilizi	EC D kgCO ₂ eq
<i>Calcestruzzo gettato in opera</i>	-279.5
<i>Calcestruzzo prefabbricato</i>	-204.2
<i>Materiale plastico (igloo)</i>	-450.7
<i>Ceramica</i>	-33.1
<i>Polistirene Espanso</i>	-1 820.3
<i>Alluminio</i>	-2 933.8
<i>Vetro</i>	-17.9
<i>Legno</i>	-672.8
<i>Acciaio</i>	-5 792.3
	-12 204.6

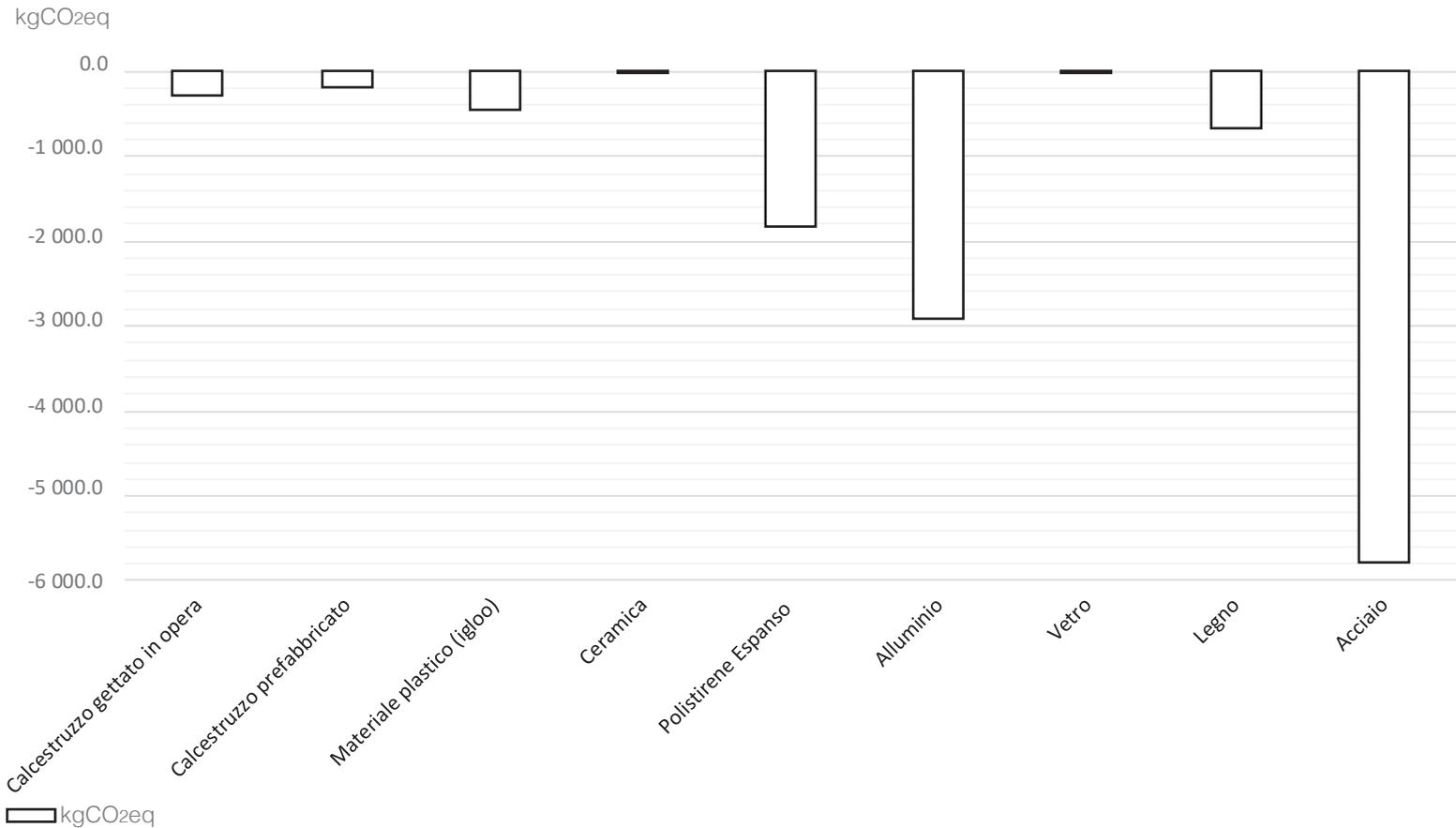


Fig.68 Suddivisione dei benefici apportati (in termini di EC) dal reimpiego di alcuni materiali caratteristici del manufatto in via tabellare e grafica

Embodied Carbon	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC D	-12 204.6	EC D	-1.227

10.7. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODED CARBON DI IMPIANTI E SERVIZI

Per la valutazione dell'*Embodied Carbon* degli impianti e servizi del manufatto architettonico in esame, si è deciso di attuare una contabilizzazione tramite metodo base; nella fattispecie si è proceduto tramite la modalità definita come quella dei *dati medi generici*, la quale prevede l'impiego di dati generici desunti da *Ökobaudat* e afferenti a **quattro** diverse tipologie di impianto, ovvero: l'impianto fotovoltaico e solare, l'impianto di riscaldamento a pavimento radiante e infine la contabilizzazione dell'EC relativa al sistema di generazione di pompa di calore (comprensivo di unità interna ed esterna) (si veda la Fig. 69, 70).

Si ricorda inoltre che la procedura base secondo la modalità dei *dati medi generici*,

come presentato dettagliatamente all'interno del capitolo 6.8., consta di quattro fondamentali passaggi. Infatti, in primo luogo si è contabilizzato (tramite utilizzo di banca dati) le emissioni relative alle fasi A1-A4 e C2-C4; poi attraverso l'associazione del 10% delle emissioni contabilizzate nella fase A1-A3 si sono restituiti i valori di B2-B4.

Tali valori poi sono stati **aggregati** al fine di moltiplicare la loro somma per un fattore "*buffer*" correttivo, per infine aggiungere a questo valore il quantitativo di emissioni di CO₂eq prodotte durante le fasi B1 e C1, le quali emissioni sono dovute principalmente alla perdita di **refrigerante** della pompa di calore.

Di seguito, si riportano in maniera estremamente sintetica i risultati ottenuti per il sistema MEP del manufatto edilizio; per una sua completa trattazione si rimanda invece all'*Allegato 9*.

Componenti di impianto	Peso kg	pz. -	Peso tot. kg
<i>Pannello fotovoltaico</i>	16.0	24.0	384.0
<i>Pannello solare</i>	35.0	2.0	70.0
<i>Pompa di calore</i>	58.6	1.0	58.6
<i>Storage termico</i>	59.5	1.0	59.5
<i>Pavimento radianti</i>	338.1	1.0	338.1

910.2

Fig.69 Suddivisione degli elementi e dei loro rispettivi pesi contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon

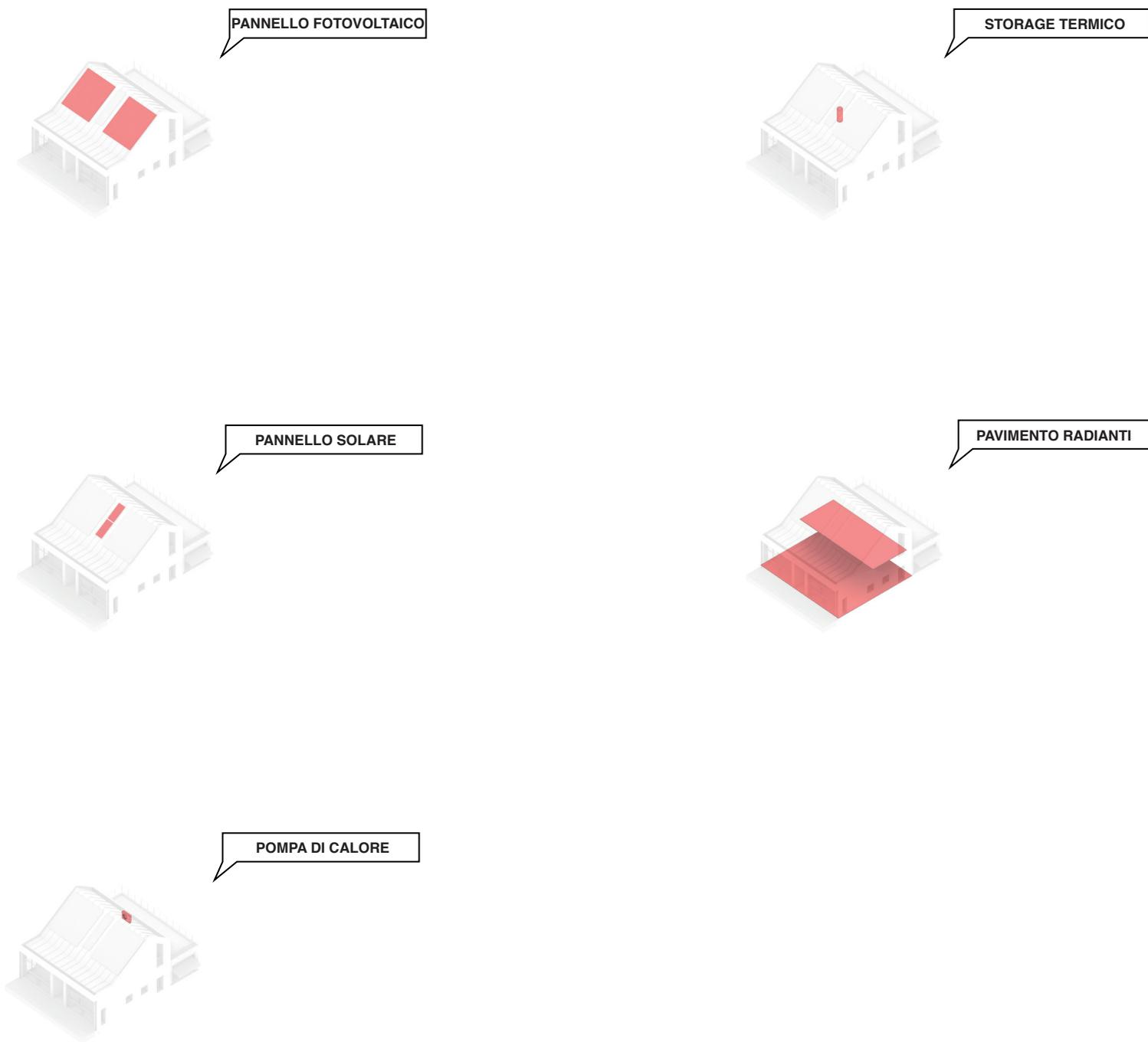


Fig.70 Suddivisione delle componenti di impianto contemplate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon del sistema MEP

Embodied Carbon	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC MEP	33 452.7	EC MEP	3.36

10.8. DETERMINAZIONE DELLA WHOLE LIFE CARBON

All'interno di questo ultimo passaggio, si propone invece il calcolo conclusivo effettuato per la determinazione della *Whole Life Carbon*, il quale si connota come uno studio di *Whole Life Carbon - Cradle to Grave*, ovvero uno studio capace di comprendere e di rendicontare **tutti** i risultati acquisiti in termini di *Embodied Carbon* che vanno dalla fase A1 fino alla fase C4.

Nonostante la sua complessità, lo studio proposto ha permesso una valutazione non solo degli impatti inerenti, ad esempio, la produzione o la manutenzione di un componente edilizio, bensì ha permesso anche la sua valutazione in termini di **benefici** ossia in termini di *Embodied Carbon* risparmiata, come nel caso della *Carbon Sequestration* degli elementi lignei o la *Carbon Uptake* degli elementi cementizi. Proprio tale passaggio, che rappresenta sicuramente uno dei punti salienti che la metodologia propone di calcolare, ha però lasciato alcune **perplexità**.

Di fatti, seppur si sottolinea nuovamente l'importanza di poter valutare i valori di EC parzialmente riassorbiti da alcune tecnologie o materiali durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, le metodologie proposte soprattutto per il calcolo della *Carbon Uptake* si reputano ad oggi forse ancora in uno stato parzialmente **embrionale**, compromettendone in questo modo la loro veridicità.

Infatti, come si può facilmente intuire

consultando il grafico sottostante, gli apporti in termini negativi dati dalla *Carbon Uptake* durante la fase C3-C4, risultano essere di **molto** superiori rispetto ai contributi di *Embodied Carbon* contabilizzati in tutte le altre fasi del ciclo di vita, rendendo non solo nulla bensì negativo il valore di *WLC* in entrambi gli scenari contemplati (ossia 100% e 70-30%).

A tal proposito, si tiene a specificare ed ipotizzare, che forse tale discostamento di risultato potrebbe essere stato causato, ad esempio, dall'ammontare dello scenario temporale di riferimento ammesso per la carbonatazione (il quale risulta essere doppio rispetto allo scenario temporale del manufatto edilizio), oppure dalla **ottimistica** restituzione (a livello normativo e di valori tabellari di riferimento) a riguardo del massimo grado teorico di assorbimento ammesso per la carbonatazione degli elementi cementizi durante il loro ciclo di vita.

Infine, per quanto concerne ancora il discorso della carbonatazione, si reputa di difficile lettura e interpretazione anche la procedura che prevede di assegnare il valore di *Carbon Uptake* esclusivamente alla quota di elementi cementizi posti in discarica. Infatti, poiché gli scenari di smaltimento, come spiegato all'interno della fase C3-C4, si differenziano per una percentuale di smaltimento a discarica **profondamente** diversa (il 100% contro il 30% del secondo scenario), risulta ovvio da capire, ma molto difficile da accettare, che i risultati

migliori in termini di *Whole Life Carbon* siano sempre appartenenti ad uno scenario di 100% a discarica, dato che all'interno di questo scenario sarà permesso al valutatore di prendere in considerazione il 100% del massimo grado di carbonatazione dedotto; **contrariamente** ad uno scenario 70-30% il quale, seppur in grado potenzialmente di riusare o riciclare il 70% dei materiali edilizi impiegati, sarà caratterizzato da uno sconto in termini di carbonatazione **solo** del 30%, rendendo così (quasi sempre) il risultato di *WLC* superiore rispetto al precedente.

Si specifica che ulteriori analisi e commenti, sempre in merito alla carbonatazione, saranno nuovamente effettuate all'interno della sezione dedicata alle "Conclusioni".

Procedendo con la trattazione, vi è poi un secondo punto che si tiene a sottolineare, ossia quello riguardante l'*Operational Carbon* (B6-B7). Infatti, come ampiamente spiegato precedentemente, questo calcolo si basa sostanzialmente sulla rendicontazione della differenza, in termini matematici, tra l'energia esportata e quella richiesta (alla rete elettrica nazionale) dal manufatto edilizio, per poi convertire tale quota energetica in $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ attraverso l'impiego di un *carbon factor*.

Si tiene a specificare, però, che essendo tale differenza **minima** nel corso delle tre date cardini decise (ovvero 2022, 2030 e 2050) questo ha comportato un discostamento ed una variazione minima nei valori di OC e di conseguenza una variazione infinitesima nei confronti dei tre valori **conclusivi** di *WLC*. Ciononostante, si è decisi comunque di presentare i suddetti valori, al fine di restituire dei bilanci conclusivi allineati con le *milestones*

della *Roadmap* europea per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni (Fig. 71).

Infine, si specifica che i valori desunti all'interno della fase D sono valori indicanti esclusivamente il grado di circolarità raggiunto dal progetto e che per questo motivo **non** considerati all'interno della rendicontazione conclusiva della *Whole Life Carbon* i cui valori sono contenuti all'interno della Figura 71.

Nella pagina seguente si mostrano i risultati di *WLC* ottenuti per il caso della *BioCasa Sarotto 2007*, calcolati secondo le formule [21] e [21a] comprensive naturalmente anche del contributo dato dalla *Operational Carbon* di progetto e dai quantitativi di *Carbon Sequestration* e *Carbon Uptake*, i quali risultano essere i principali contributi in grado di influenzare maggiormente il risultato finale. Si specifica, infine, che tali contributi (restituiti in forma di istogrammi) sono stati aggiornati per l'anno 2022.

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 **-3 553.9**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2022 **-15 900.2**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 **-17.868**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2022 **-79.941**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2030 **-3 545.7**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2030 **-15 892.0**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2030 **-17.835**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2030 **-79.899**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2050 **-3 535.7**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2050 **-15 882.0**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2050 **-17.776**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2050 **-79.849**

Fig.71 Suddivisione dei risultati di WLC raggiunti all'interno delle tre date cardini prese in considerazione (2022, 2030, 2050)

WLC BIOCASA 2007

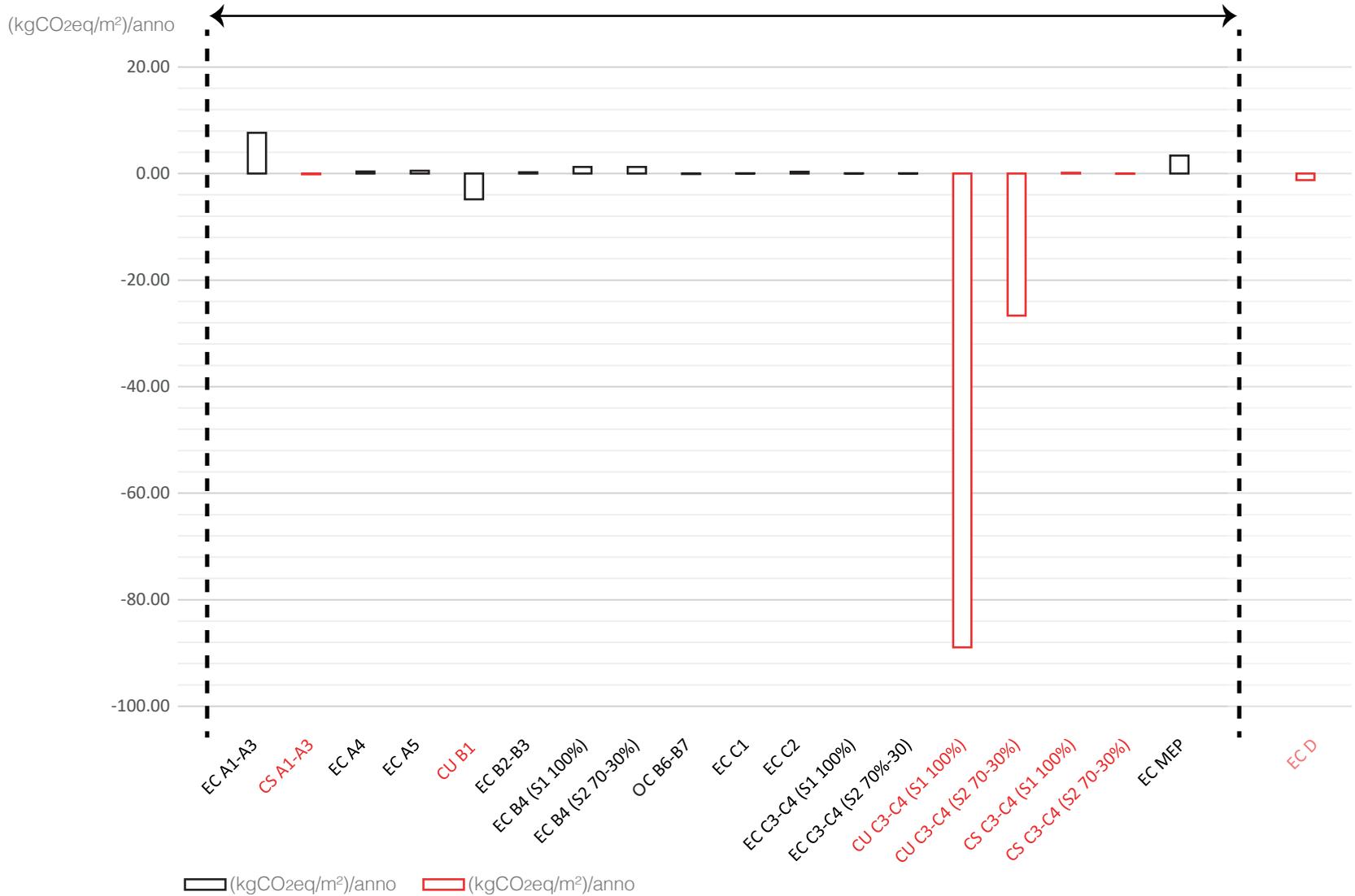


Fig.72 Suddivisione dei contributi di EC, CS, CU durante il ciclo di vita del manufatto edilizio di ogni singola fase analizzata (attualizzati all'anno 2022)

11. PROGETTO BIOCASA SAROTTO 2050

In questo undicesimo capitolo, si procederà con la presentazione del progetto di "re-thinking" della "Sarotto Group" (sviluppato in prima persona dal tesista), evidenziandone gli elementi sia di novità sia di modifica rispetto al progetto originale della BioCasa Sarotto 2007. Si ricorda che tali modifiche non incideranno sulla volumetria e sui rapporti di forma generali del manufatto, ma più sulla natura materica delle componenti edilizie impiegate.

Inoltre, all'interno di questo capitolo si provvederà sia a fornire una descrizione testuale dell'intervento ipotizzato sia a condividere degli elaborati tecnici e grafici che possano permettere una migliore e più profonda comprensione in merito al lavoro svolto per l'ipotesi di progetto della BioCasa Sarotto 2050.

Il ri-pensamento del progetto della *BioCasa Sarotto* nasce come conseguenza ad un duplice intento. Infatti, se da un lato si voleva procedere ad una caratterizzazione personale del progetto pensato e costruito dalla "Sarotto Group", prevedendo quindi un impiego diverso di materiali (sia a livello strutturale che di finitura superficiale), da un altro punto di vista si è cercato di attuare una modifica del progetto tale che potesse giustificare un **secondo** impiego della metodologia di rendicontazione WLC mostrata.

Nel dettaglio, il progetto del *BioCasa 2050* non prevede di modificare in alcun modo la geometria architettonica del manufatto al

fine di poter comparare, in maniera naturale e coerente, i risultati ottenuti dalle due "proposte" progettuali, cercando in questo modo di impiegare i risultati ottenuti dalla metodologia WLC come dei possibili **parametri** idonei per la scelta di una nuova alternativa progettuale.

Come si potrà facilmente intuire dal nome, il progetto della *BioCasa Sarotto 2050* ha fin da subito cercato di ottimizzare i risultati di *Embodied Carbon*, cercando sempre di ottenere dei risultati **inferiori** rispetto a quelli acquisiti dalla prima rendicontazione.

Prima di procedere con la descrizione delle specifiche scelte progettuali fatte, si tiene

a specificare che ogni scelta è sempre stata confrontata con quanto fatto in precedenza dall'impresa edile cuneese. Infatti, ogni elemento tecnico, seppur sarà modificato in termini di matericità nei suoi strati funzionali (prevedendo un maggiore uso di elementi a base lignea e meno a base cementizia) conserverà al contempo le stesse caratteristiche **fisiche**, sia in termini di permeabilità che, soprattutto, di trasmittanza.

Nel dettaglio, come detto in precedenza, all'interno di questa operazione di riprogettazione si è cercato il più possibile di sostituire gli elementi in calcestruzzo con elementi a base **lignea**, prevedendo un impiego dei secondi anche per le finiture sia queste interne che esterne. Perciò, se a livello di fondazione la configurazione rimane identica con il caso del 2007, ciò non si può dire per gli strati portanti delle pareti perimetrali opache le quali non prevedono più un impiego di una doppia lastra in calcestruzzo prefabbricato ma bensì un impiego di pannelli da 10 cm in **X-Lam**, eliminando in questo modo anche la presenza dei pilastri in calcestruzzo gettato in opera che, come visto in precedenza, erano stati realizzati dalla *Sarotto Group* per ragioni di stabilità strutturale. Inoltre, tale sostituzione è avvenuta anche per lo strato portante dei solai di interpiano e di copertura, sostituendo la soletta in predalles con un solaio in X-lam dallo spessore di 16 cm.

Ulteriore modifica è stata compiuta poi anche per gli strati isolanti, infatti come visto precedentemente, il caso studio di Narzole oggi prevede un largo utilizzo di isolanti a base di polistirene espanso, il quale si prevede di poter sostituire attraverso l'impiego di nuovi isolanti

in fibra di legno (sia nel caso verticale che orizzontale, mutando naturalmente la densità dello strato isolante a base lignea).

Per quanto riguarda gli elementi in acciaio invece, è stata prevista una sostituzione di questi con dei nuovi elementi a base lignea, sia nel caso delle porte di ingresso al garage, che del parapetto e che, soprattutto, nel caso del corpo scala.

Infine, si tiene a specificare che anche gli infissi esterni, precedentemente in alluminio, sono stati idealmente sostituiti con dei serramenti lignei. Tale sostituzione però ha permesso di mantenere il *layout* originale delle finestre, ad eccezione fatta per i due serramenti posti a sud, i quali sono stati leggermente modificati a livello di proporzioni tra la pannellatura in vetro trasparente e il serramento, al fine di dare giovamento a livello architettonico al manufatto. Si ricorda, inoltre, che a livello di finiture interne si prevede di sostituire la pavimentazione in ceramica con una pavimentazione in legno, la quale poi sostituisce anche la pavimentazione esterna del solaio interpiano, precedentemente in blocchi di calcestruzzo.

Per quanto concerne invece il lato impiantistico, non sono state effettuate molte modifiche rispetto all'originale, prevedendo esclusivamente di modificare, e **maggiorare**, la superficie adibita a fotovoltaico.

Infatti, in accordo anche con quanto pensato dall'impresa edile, ad oggi si considera l'impianto solare parzialmente superfluo poiché all'interno della *BioCasa* risulta già essere presente (al piano 0) un accumulatore termico, il quale risulta essere in grado di sopperire

alla mancanza di un impianto solare per la produzione di acqua calda sanitaria.

L'eliminazione quindi dei due pannelli solari ha dato la possibilità di mutare la configurazione dell'impianto fotovoltaico originale, al fine di adibire ad impianto fotovoltaico una superficie finale di 65.3 m² (contro i soli 35 m² iniziali) la quale vedrà installati alcuni dei migliori pannelli fotovoltaici sul mercato (da 415 Wp).

In conclusione, di seguito sono riportati alcuni elaborati **tecnici e grafici** per far meglio comprendere sia sotto il punto di vista architettonico che, naturalmente, tecnologico le specifiche scelte effettuate in questa riprogettazione ipotetica (si veda Fig.73).

Inoltre, da pagina 181 a pagina 183, sono riportati degli stralci di sezione raffiguranti le nuove componenti tecnologiche impiegate, le quali conservano le stesse caratteristiche di inerzia termica del progetto *BioCasa Sarotto 2007*.

Per queste stesse componenti è stata effettuata anche una verifica della condensa interna, graficizzata attraverso il Diagramma di *Glaser*, e calcolata attraverso il foglio di calcolo *Calcolo dei parametri termici dinamici dei componenti edilizi secondo la norma ISO/DIS 13786:2008* prodotto dal *Politecnico di Torino*.

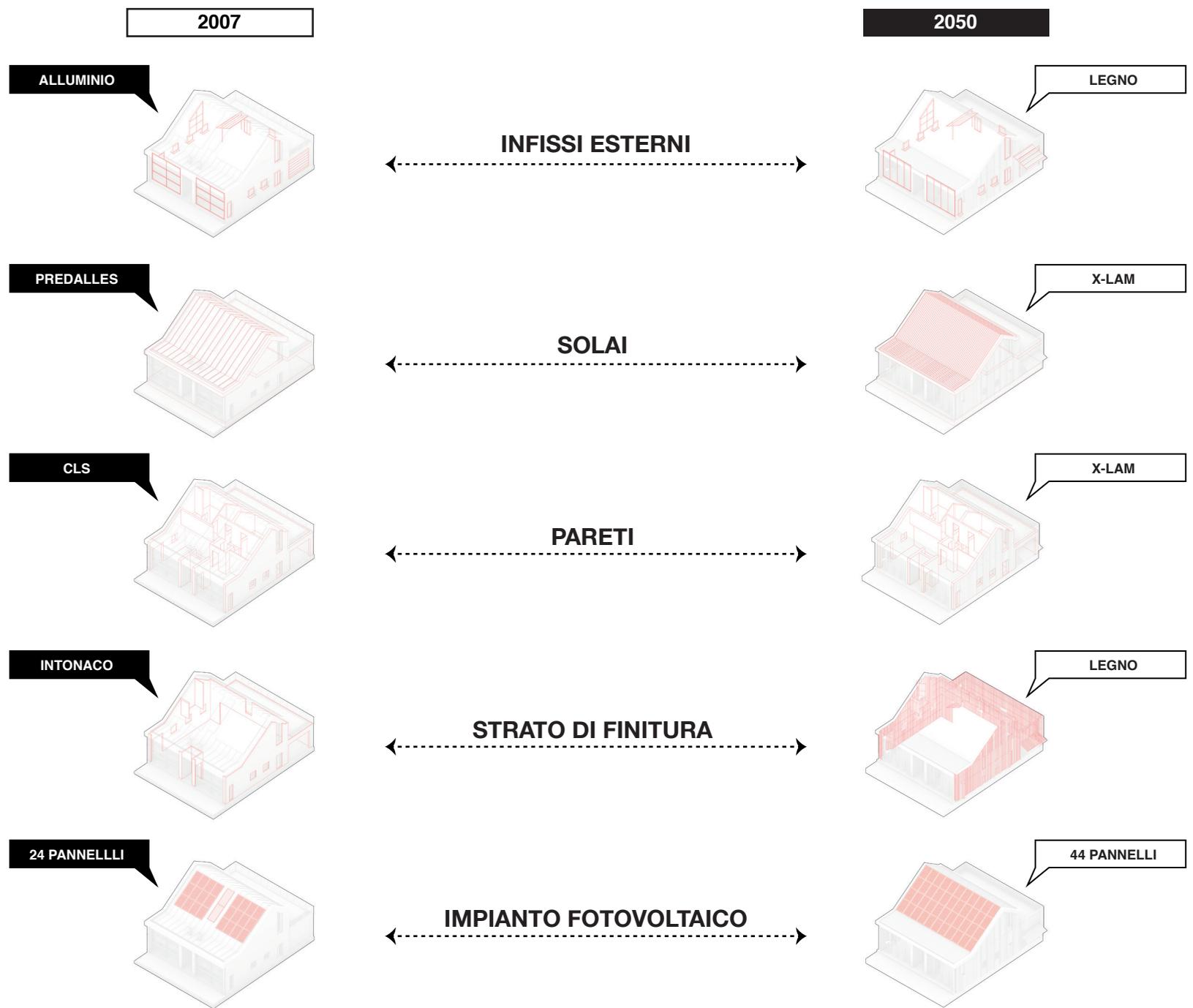


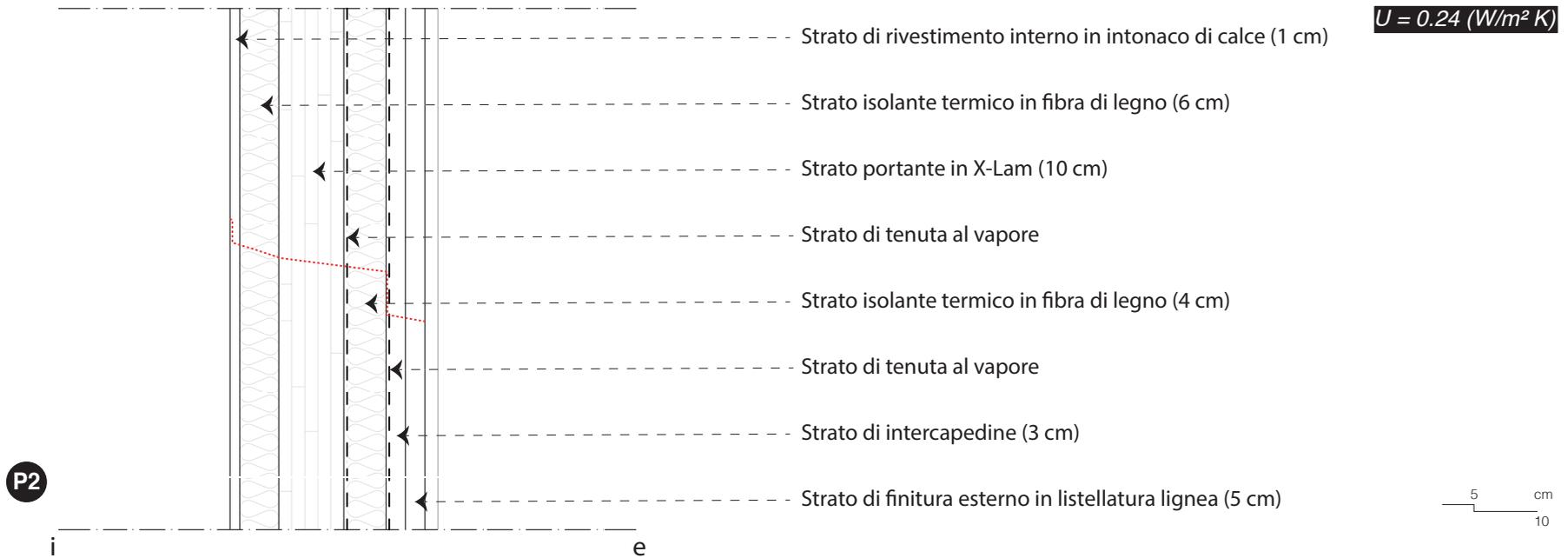
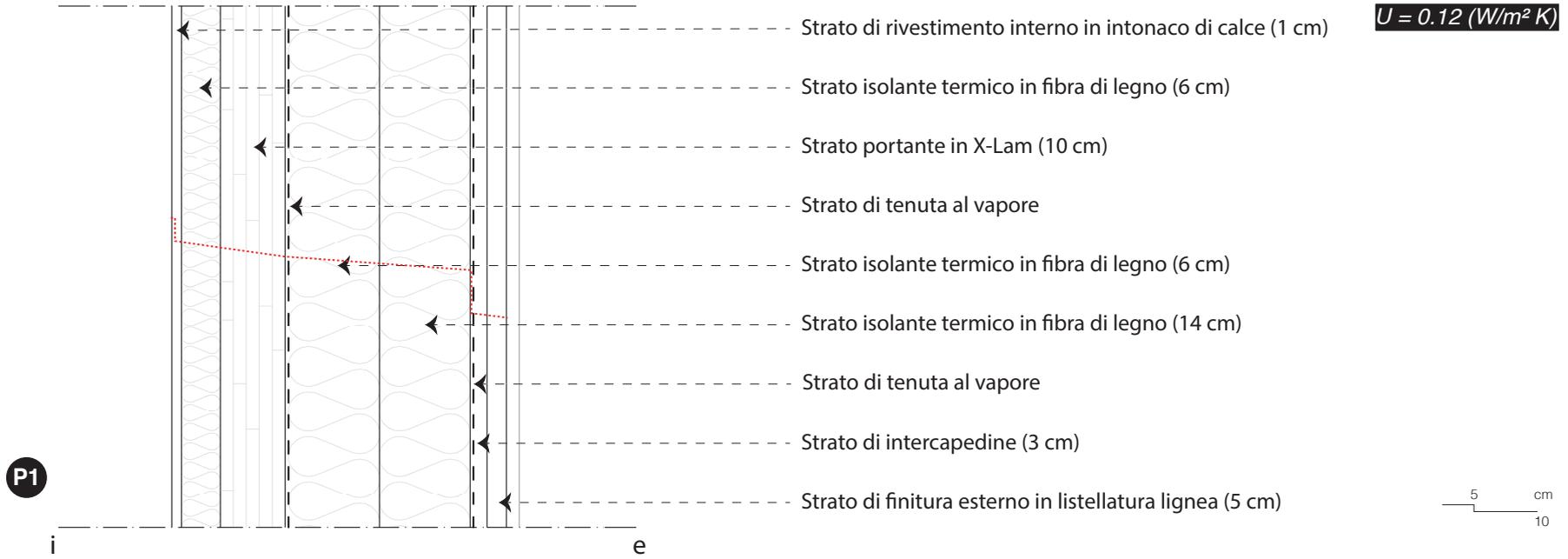
Fig.73 Confronto tra le alterazioni degli elementi principali dei casi studio "BioCasa Sarotto 2007" e "BioCasa Sarotto 2050"

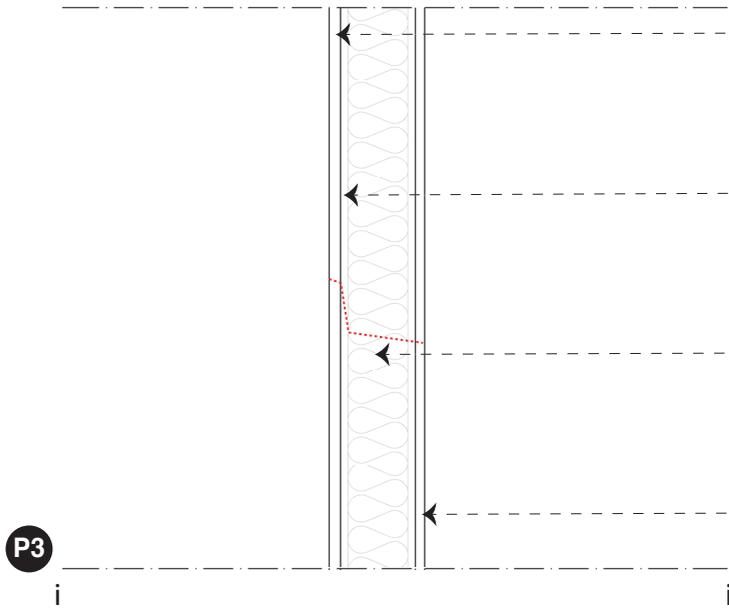


Fig. 74 Prima renderizzazione dell'ipotesi di progetto BioCasa Sarotto 2050



Fig. 75 Seconda renderizzazione dell'ipotesi di progetto BioCasa Sarotto 2050





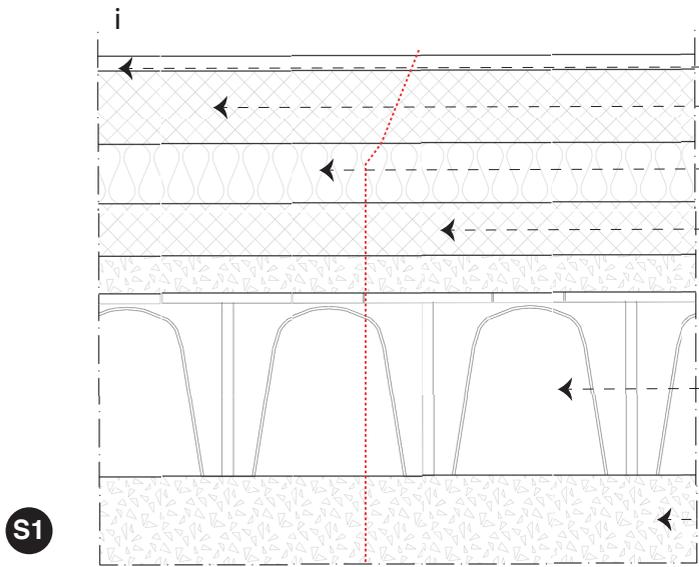
Strato di finitura interno in pannellatura lignea (1.5 cm)

Strato portante in telaio ligneo (10 cm)

Strato isolante termico in fibra di legno (8 cm)

Strato di finitura interno in pannellatura lignea (1.5 cm)

$U = 0.30 (W/m^2 K)$



Strato di rivestimento superiore in legno (1 cm)

Strato di sostegno in cls (10 cm)

Strato isolante termico in XPS (8 cm)

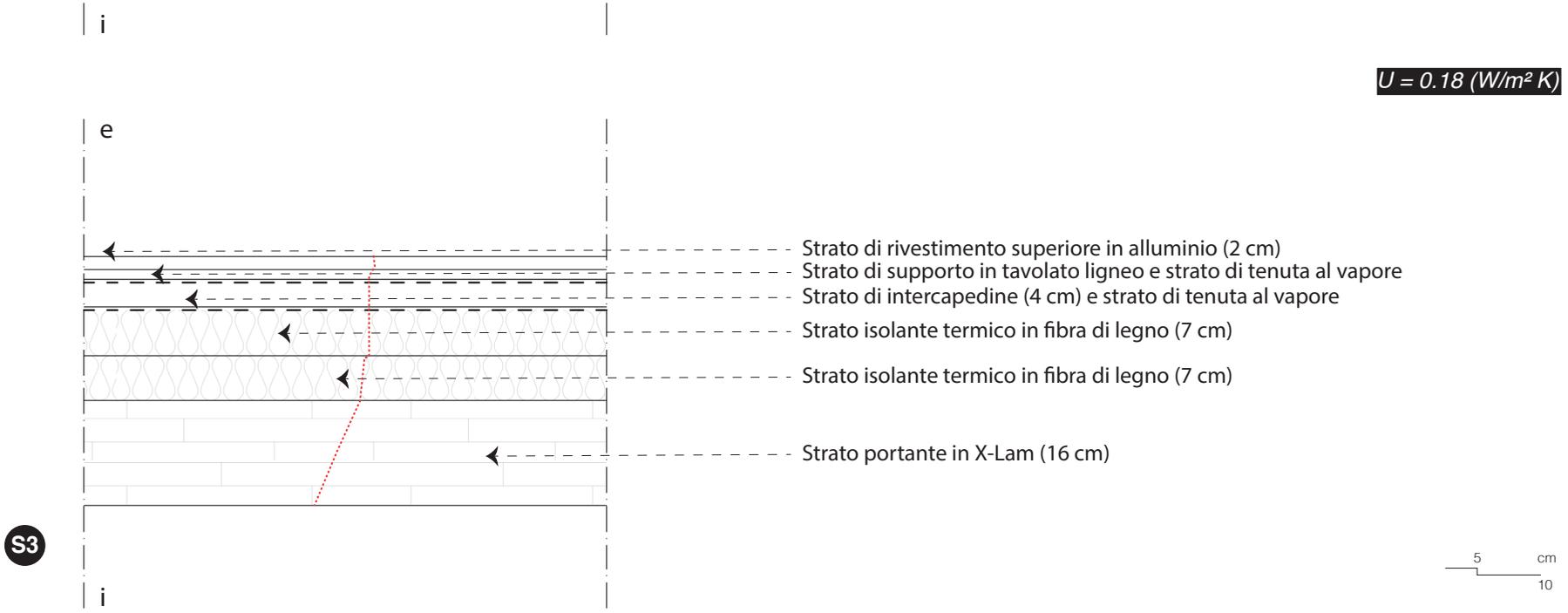
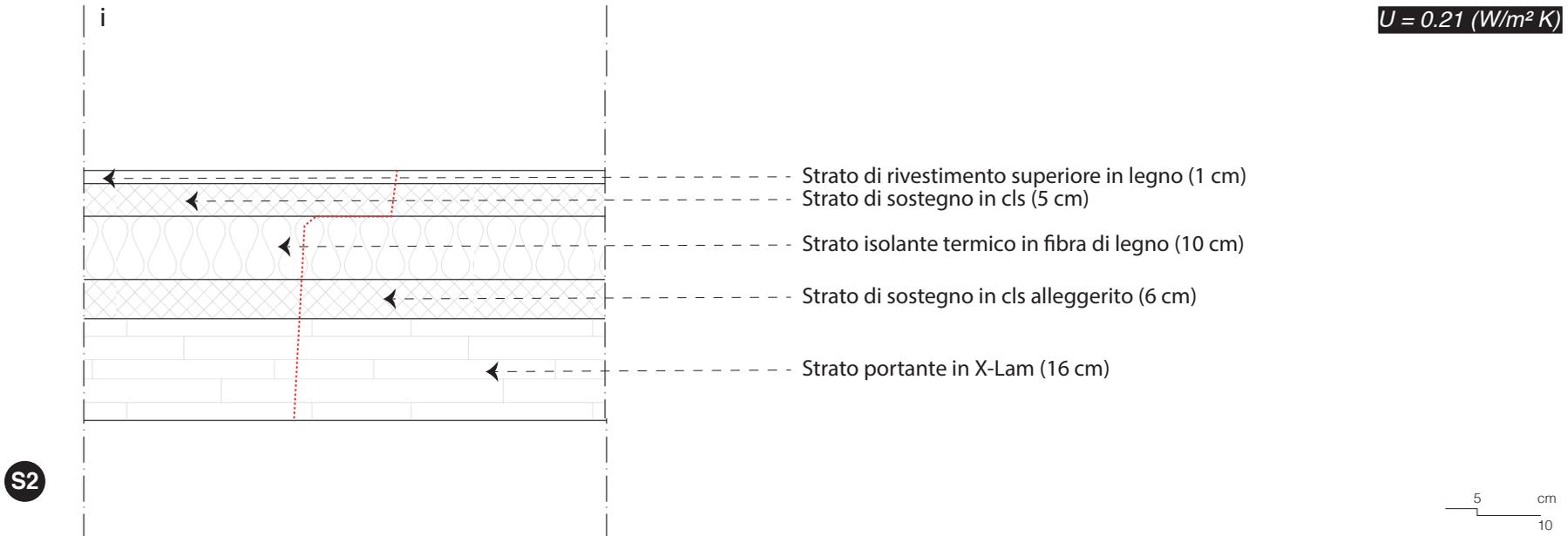
Strato di sostegno in cls alleggerito (7 cm)

Strato di intercapedine (igloo) (25 cm)

Struttura portante oriz. in cls gettato in opera (30 cm)

$U = 0.22 (W/m^2 K)$





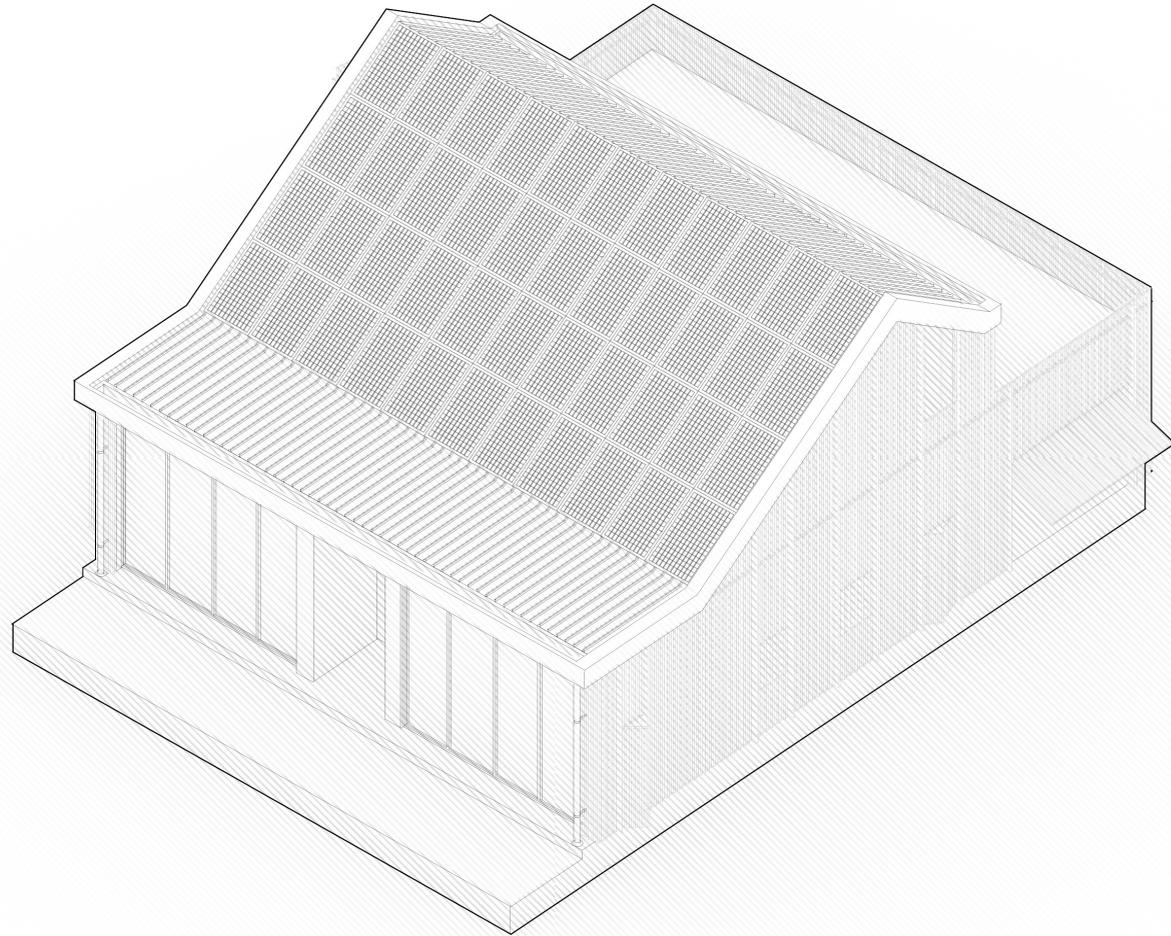


Fig. 76 Restituzione da parte dell'autore della Biocasa Sarotto 2050 in vista assonometrica

12. VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON DELLA BIO CASA SAROTTO 2050

In questo dodicesimo capitolo, si procederà con la contabilizzazione dell'Embodied Carbon e dell'Operational Carbon del progetto ipotetico della BioCasa Sarotto 2050.

L'elaborazione di questa contabilizzazione è proceduta seguendo pedissequamente lo stesso iter procedurale del caso mostrato nel capitolo nove.

Si sottolinea perciò, come la contabilizzazione della Whole Life Carbon sia stata eseguita tramite l'utilizzo di una metodologia base la quale, per ogni procedura di calcolo, si è servita dell'ausilio del database tedesco Ökobaudat.

In linea con il caso precedente, anche qui, si procederà alla contabilizzazione dell'Embodied Carbon, sia per il lato puramente architettonico dell'abitazione sia per il lato impiantistico e di servizio (ovvero il sistema MEP), e anche dell'Operational Carbon rendicontando in questo modo i contributi in termini di anidride carbonica equivalente generati dalle fasi di uso energetico del manufatto (nel dettaglio le fasi B6 e B7).

Allo stesso modo, si tiene a specificare, che anche per la BioCasa Sarotto 2050 si calcoleranno i potenziali benefici in termini di Embodied Carbon dati da un rimpiego o un riciclo dei materiali da costruzione ipotizzati, al fine di poter caratterizzare il manufatto "2050" anche con un livello (ipotetico) di circolarità.

Infatti, l'importanza di riportare e di calcolare allo stesso modo permetterà (nella parte delle conclusioni) di poter confrontare e discutere in merito ai risultati ottenuti, in termini di Whole Life Carbon, dalle due diverse versioni del manufatto di Narzole.

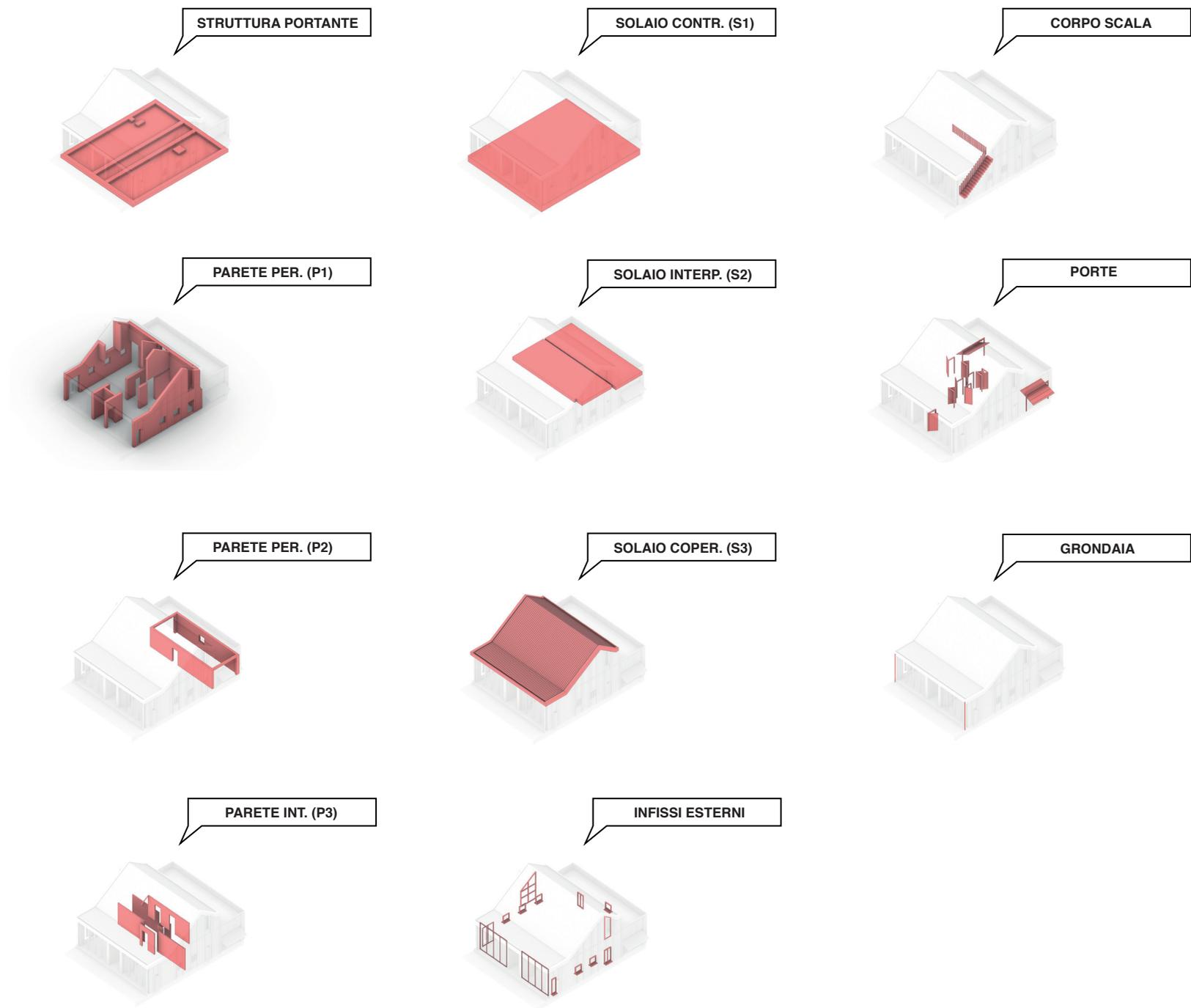


Fig.77 Suddivisione del manufatto edilizio "BioCasa Sarotto 2050" nei suoi principali elementi edilizi contemplati per il calcolo della WLC

12.1. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI PRODUZIONE (A1-A3)

All'interno di questa prima fase del ciclo di vita, sono stati contabilizzati i contributi di Embodied Carbon per le fasi di estrazione, trasporto e trasformazione dei prodotti che saranno poi conferiti nel cantiere piemontese, suddivisi in vari elementi edilizi i quali sono esplicitati all'interno della Figura 77.

Infatti, si specifica, che la procedura di contabilizzazione è stata la medesima di quella ampiamente mostrata e descritta all'interno del capitolo 10.1., andando perciò a contabilizzare dapprima il quantitativo di chilogrammi di prodotto **realmente** conferito in cantiere, prodotto definito da *Bill of quantities* (attraverso l'impiego del noto fattore "fpro"), e poi, attraverso l'impiego di *Ökobaudat*, andare a contabilizzare gli impatti di *Embodied Carbon* A1-A3 totali.

Naturalmente, poiché le procedure dei due casi studio sono state eseguite in maniera identica sia nella contabilizzazione che nella restituzione dei risultati, si ricorda che tali valori di emissione saranno **suddivisi**, all'interno degli elaborati grafici e tabellari, sempre secondo i principali elementi edilizi costituenti il manufatto edilizio.

Inoltre, si ricorda di come per il progetto *BioCasa Saratto 2050* sia stato fondamentale (visto il largo uso di elementi a base **lignea**) rendicontare anche il contributo in termini di *Embodied Carbon* stoccata durante la fase genericamente definita di Produzione (contributo che, come visto, prende il nome di *Carbon Sequestration* A1-A3).

Si specifica infatti, che tale contributo, il quale è stato calcolato rispettando la metodologia base ovvero prevedendo una capacità di **stoccaggio** dell'anidride carbonica in atmosfera pari a 1,64 kgCO₂eq su kg di prodotto ligneo, sarà sempre riportato in maniera distinta e separata rispetto ai contributi accumulati di EC_{A1-A3}.

Di seguito, saranno mostrati i risultati ottenuti prima in termini di *Embodied Carbon* e, solo in seguito, di *Carbon Sequestration* consultabili all'interno delle Figure 78 e 79, dalle quali si evince chiaramente sia come i maggiori contributi di EC nelle fasi A1-A3 sono imputabili alla struttura portante orizzontale, realizzata in calcestruzzo gettato in opera, sia come i maggiori benefici in termini di *Carbon Sequestration* sono riportati dalla struttura portante orizzontale e verticale in X-lam. Inoltre, si sottolinea di come i due contributi calcolati (matematicamente di segno opposto) siano sostanzialmente equivalenti, a differenza della *BioCasa Sarotto 2007* in cui il quantitativo di EC_{A1A3} era di molto superiore rispetto alla CS_{A1A3}.

Infine, si specifica che per una lettura più dettagliata dei procedimenti seguiti e adottati per la rendicontazione di questi due contributi, può essere consultato l'*Allegato 10*.

EC A1-A3

Elementi edilizi	kgCO ₂ eq
Struttura portante	24 270.5
Pareti perimetrali (P1)	7 414.8
Pareti perimetrali (P2)	1 094.1
Pareti interne (P3)	632.6
Solaio controterra (S3)	9 495.9
Solaio interpiano (S2)	3 898.4
Solaio di copertura (S1)	7 380.1
Infissi esterni	2 154.8
Corpo Scala	63.8
Porte	1 239.2
Grondaia	64.6

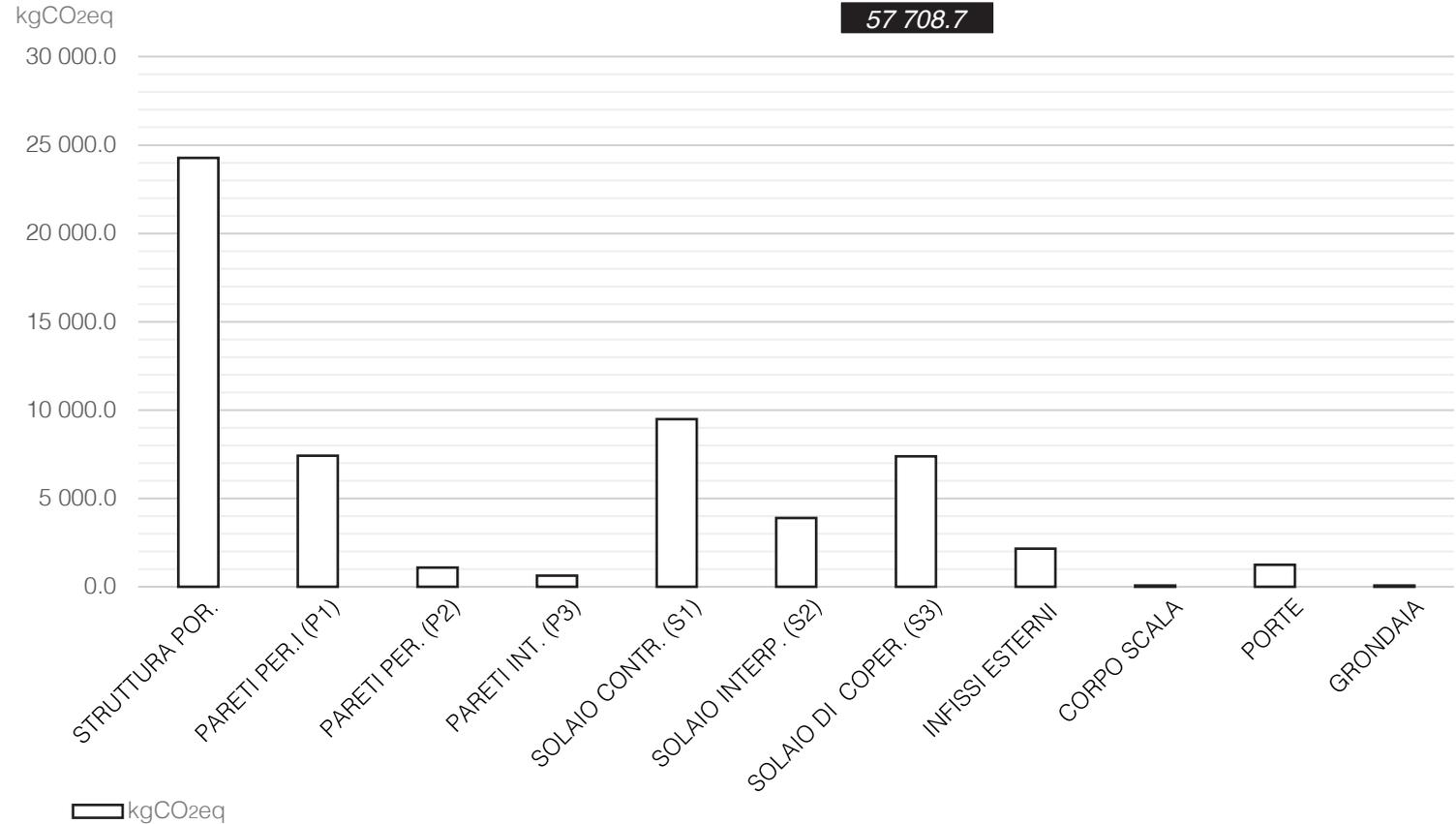


Fig.78 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fasi A1-A3 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Elementi edilizi	CS A1-A3 kgCO ₂ /kg	Peso kg	CS A1-A3 tot. kgCO ₂
<i>Strato portante in X-Lam</i>	1.64	25 401.1	41 657.8
<i>Strato di finitura esterno in listellatura lignea</i>	1.64	2 451.5	4 020.5
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	1.64	575.2	943.3
<i>Strato di rivestimento superiore in legno</i>	1.64	2 789.3	4 574.5
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	1.64	6 075.4	9 963.7
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	1.64	371.7	609.6
<i>Porte interne in legno</i>	1.64	583.3	956.6
<i>Porta garage in legno</i>	1.64	222.2	364.4
<i>Strato di supporto in telaio ligneo</i>	1.64	375.4	615.6
<i>Strato portante in telaio ligneo</i>	1.64	577.5	947.1
<i>Corpo scala in legno</i>	1.64	473.9	777.2
<i>Elemento di protezione parapetto in legno</i>	1.64	75.3	123.4
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	1.64	1 097.5	1 799.8
			-67 353.5

Fig.79 Suddivisione dei contributi di Carbon Sequestration nelle fasi A1-A3

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A1-A3	57 708.7	EC A1-A3	5.80
Carbon Sequestration	kgCO ₂ eq	Carbon Sequestration	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
CS A1-A3	-67 353.5	CS A1-A3	-6.77

12.2. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI COSTRUZIONE (A4-A5)

12.2.1 EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO AL CANTIERE (A4)

Per quanto concerne la fase A4, la contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica correlate con la fase di trasporto, ha previsto ovviamente un'operazione di **astrazione** in merito alle distanze da percorrere.

Data la volontà, all'interno di questa nuova progettazione, di preferire sempre la configurazione di uno scenario il più sostenibile possibile, si è deciso di porre ogni volta (in termini di distanze) uno scenario di tipo **locale**, pari quindi a 50 km.

Tale decisione, è stata giustificata anche dal fatto di aver ricercato sempre l'impiego, all'interno del progetto, di tipologie di materiali facilmente reperibili all'interno del panorama edile piemontese (come nel caso dei materiali a base lignea).

Inoltre, si tiene sempre a ricordare che la procedura di contabilizzazione seguita per la fase A4 anche in questo ha conservato le stesse caratteristiche e metodologie presentate all'interno del capitolo 10.2.1.

Di seguito sono condivisi, in maniera condensata e riassuntiva, i risultati ottenuti di

Embodied Carbon dalla fase di Trasporto A4 (Fig. 80); per una più dettagliata presa di visione dei risultati e dei parametri desunti ai fini della rendicontazione si invita a consultare l'*Allegato 11*.

EC A4

Elementi edilizi	kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante</i>	2 931.4
<i>Pareti perimetrali (P1)</i>	69.7
<i>Pareti perimetrali (P2)</i>	27.9
<i>Pareti interne (P3)</i>	9.5
<i>Solaio controterra (S3)</i>	57.7
<i>Solaio interpiano (S2)</i>	72.4
<i>Solaio di copertura (S1)</i>	104.1
<i>Infissi esterni</i>	8.6
<i>Corpo Scala</i>	3.7
<i>Porte</i>	5.4
<i>Grondaia</i>	0.2

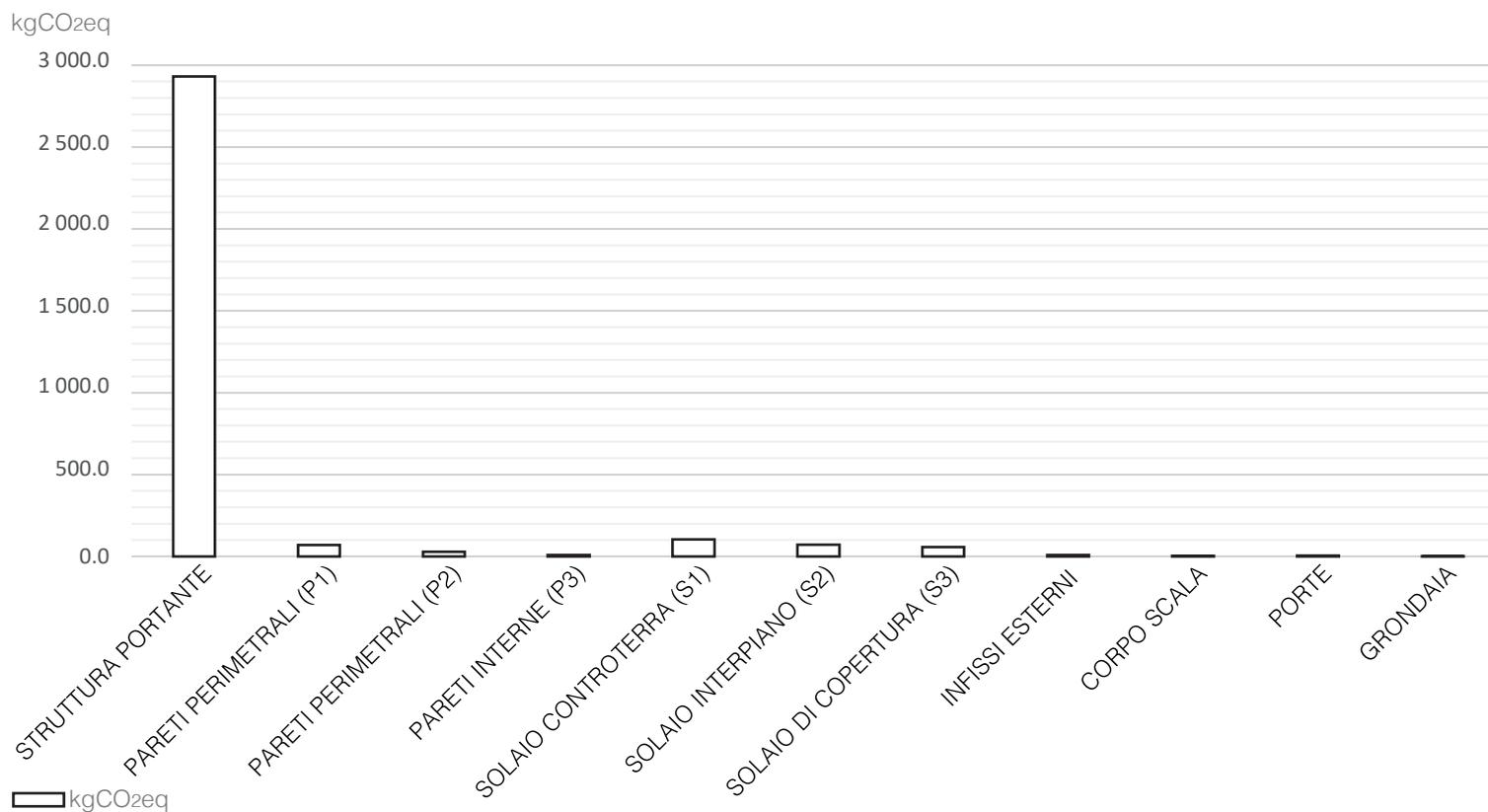
3 290.5

Fig.80 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fase A4 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A4	3 293.1	EC A4	0.33

12.2.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI COSTRUZIONE (A5)

La contabilizzazione della Fase di costruzione A5, in termini di Embodied Carbon, ha richiesto al valutatore un'astrazione e una **supposizione** circa le tecniche di costruzione e l'utilizzo di mezzi *off-road* impiegabili per la realizzazione del manufatto edilizio (esplicitati in Fig. 81).

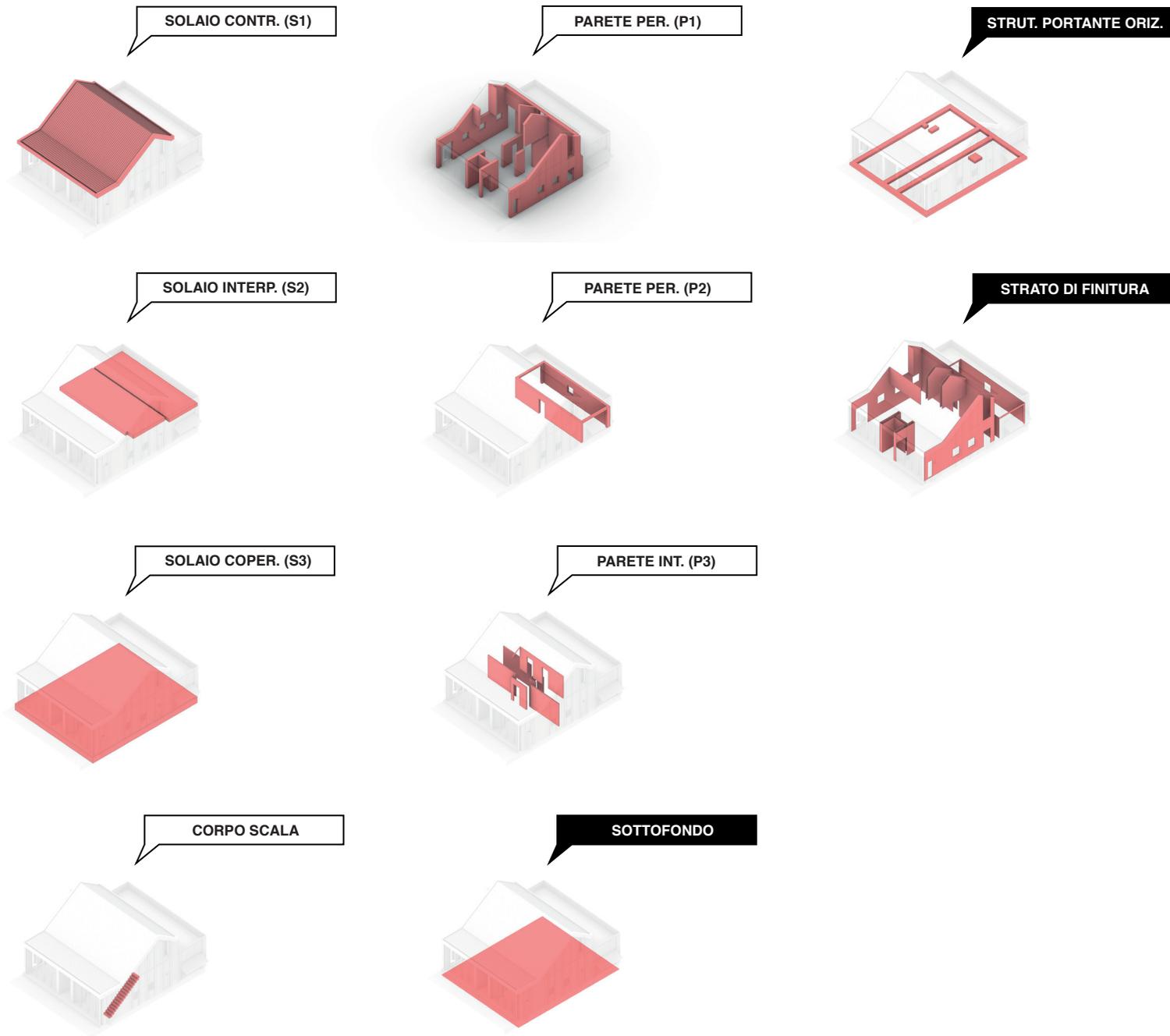
Infatti, cercando di comprendere il più possibile e di seguire ciò che l'impresa "Sarotto Group" aveva previsto nell'anno 2007 per la realizzazione del progetto, si è deciso (ancora una volta) di prevedere all'interno del cantiere due principali mezzi di costruzione, ovvero: autogrù e miscelatore.

Si ritiene, tale decisione, come la più credibile possibile dato che il manufatto edilizio, seppur abbia modificato pesantemente la sua natura materica, ha confermato l'ambivalenza tra elementi prefabbricati, i quali richiedono un **sollevamento** per la loro installazione (come nel caso delle pareti perimetrali verticali, pareti interne, solai e corpo scala), e di elementi gettati in opera, bisognosi di una **miscelazione** per la loro realizzazione (come strati di finitura superficiali interni o struttura portante orizzontale e sottofondo di protezione).

Per questo motivo, anche in questa fase, sono stati impiegati i valori generici di alcuni

mezzi di costruzione, desunti sempre dal foglio SCAB (SCAB 2023), il quale ha permesso poi di calcolare l'ammontare in termini di anidride carbonica equivalente i contributi provenienti dalla fase A5.

Di seguito, per agevolare la consultazione, sono riportati i valori riassuntivi di EC_{A5} (Fig. 82). Per una consultazione invece più completa e comprensiva di tutto, si invita alla lettura dell'*Allegato 12*.



□ Impiego di autogrù ■ Impiego di miscelatore

Fig.81 Suddivisione degli elementi edilizi e dei mezzi off-roads contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon della fase A5

Elementi edilizi	kgCO ₂ eq
<i>Solaio di copertura (S3)</i>	1 962.13
<i>Solaio interpiano (S2)</i>	208.89
<i>Solaio controterra (escluse fondazioni) (S1)</i>	306.91
<i>Corpo scala</i>	292.85
<i>Pareti perimetrali (P1)</i>	1 502.93
<i>Pareti perimetrali (P2)</i>	437.33
<i>Pareti interne (P3)</i>	498.17
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	6.77
<i>Struttura portante orizzontale</i>	24.13
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	0.90
	5 241.1

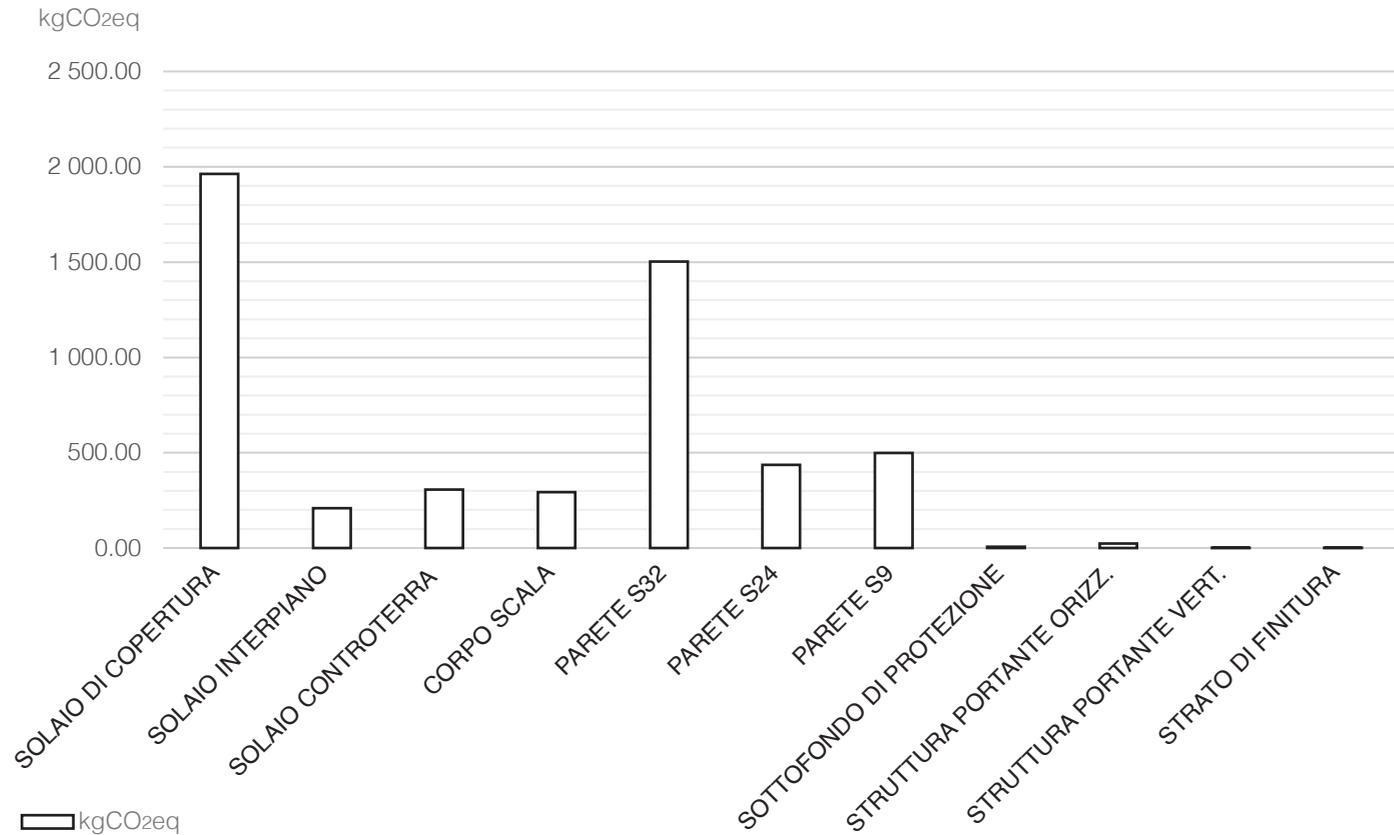


Fig.82 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase A5 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC A5	5 241.1	EC A5	0.53

12.3. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI USO (B1-B4)

12.3.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI USO (B1)

All'interno di questa fase, si è proceduti con la contabilizzazione dei quantitativi di anidride carbonica prodotta o assorbita dagli elementi costituenti il manufatto architettonico, naturalmente durante la fase di Uso (B1).

Come per il caso precedente (ovvero la *BioCasa Sarotto 2007*), anche in questa rendicontazione è stato dedotto l'ammontare in termini di kgCO₂eq della *Carbon Uptake B1*, la quale indica il quantitativo di anidride carbonica **assorbita** dagli elementi cementizi tramite la reazione di carbonatazione. Tale contabilizzazione, di nuovo, ha riproposto non solo il procedimento metodologico di base, ma anche le correzioni ipotizzate ed esplicitate già all'interno del capitolo 10.3.1, in merito al grado di carbonatazione e al **massimo** assorbimento teorico di carbonio da parte degli elementi cementizi.

Nel dettaglio, all'interno di questa rendicontazione sono stati presi in esame i contributi di *Carbon Uptake* propri degli elementi cementizi costituenti il solaio di interpiano e il pacchetto tecnologico della struttura portante orizzontale, considerando per questa

particolare unità tecnologica come scenario di esposizione quello interrato.

Perciò, come già ampiamente discusso all'interno del capitolo 10, si è proseguiti andando ad ipotizzare alcune caratteristiche tipologiche proprie del *mix-design* del calcestruzzo impiegato per la realizzazione degli elementi contemplati (ad esempio ipotizzando la natura tipologica del *clinker* utilizzato). Tali asserzioni hanno poi permesso, attraverso la consultazione della **normativa** di appartenenza, di individuare il valore dei parametri necessari per la contabilizzazione della *Carbon Uptake* della fase B1. Inoltre, si ricorda, come anche in questo caso sia stato preso in considerazione il contributo in termini di *Carbon Uptake* dello strato di finitura superficiale interno, il quale risulta naturalmente essere in intonaco di calce. Per questo motivo e per la natura "preliminare" di questa progettazione, sono stati presi i medesimi valori di riferimento generici prodotti e divulgati all'interno del già citato report di Eula, *Calce come deposito naturale di Carbonio* (Eula 2021).

Si tiene a specificare che tale contributo di carbonatazione, da parte dello strato di **intonaco**, sarà contabilizzato solo all'interno della fase di Uso B1, poiché all'interno della fase di smaltimento rifiuti (C3-C4) il suddetto strato risulta essere **saturo** e quindi incapace di attuare un processo di carbonatazione.

Di seguito, sono mostrati i risultati ottenuti in termini di *Carbon Uptake* all'interno della fase di Uso (B1) sia per gli elementi cementizi (all'interno della Fig. 83, 85) sia per lo strato di finitura in intonaco (Fig. 84).

	A m ²	CLINKER %	UTCC kgCO ₂ /kg	k mm/anno	t anni	DC %	Cpi kg/m ³	CU B1 kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	205.0	80%	0.5	0.8	50.0	85%	250.0	3 740.5
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	205.0	80%	0.5	0.8	50.0	85%	250.0	3 740.5
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (6 cm)</i>	89.2	80%	0.5	2.3	50.0	40%	250.0	2 201.8
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (5 cm)</i>	89.2	80%	0.5	4.6	50.0	40%	250.0	4 402.0
								-14 084.1

Fig.83 Suddivisione dei contributi di Carbon Uptake nella fase B1 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare

	EC ₁ A1-A3 kgCO ₂ eq	EC ₂ A1-A3 kgCO ₂ eq	Perc. %	CU B1 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	516.4	344.3	33%	113.6

Fig.84 Restituzione della carbonatazione contabilizzata all'interno della fase B1 per lo strato di finitura superficiale

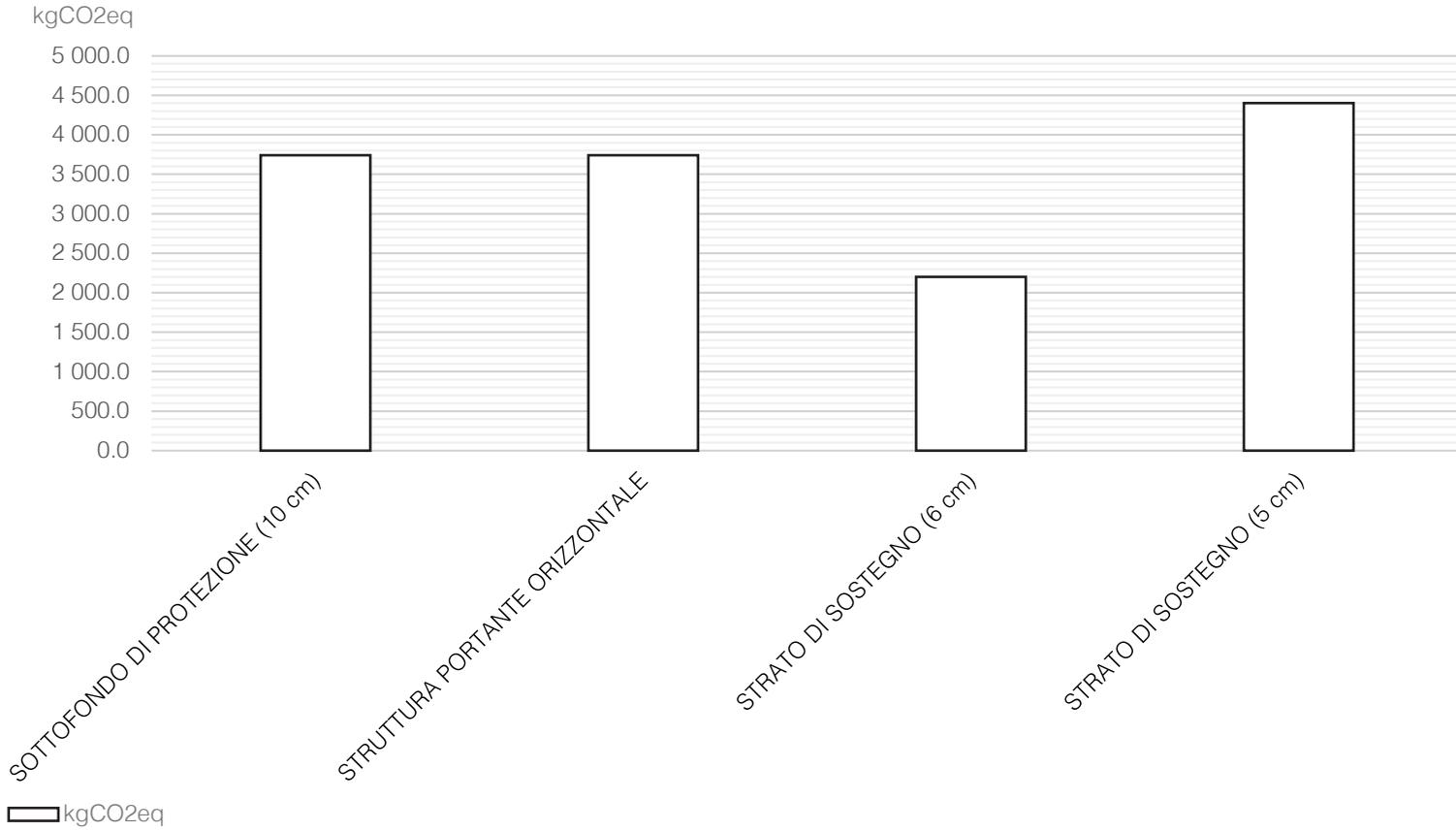


Fig.85 Suddivisione dei contributi di Carbon Uptake nella fase B1 secondo i principali elementi edilizi in via grafica

Carbon Uptake	kgCO ₂ eq	Carbon Uptake	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
CU B1 (valore negativo)	-14 197.7	CU B1 (valore negativo)	-1.43

12.3.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI MANUTENZIONE (B2) E RIPARAZIONE (B3)

All'interno di questo paragrafo si procede con la contabilizzazione dell'*Embodied Carbon* prodotta durante le fasi di Manutenzione (B2) e Riparazione (B3).

Come spiegato all'interno del paragrafo 10.3.2., per la rendicontazione dell'anidride carbonica delle fasi B2-B3 risulta essere fondamentale l'elaborazione di un dettagliato piano di **manutenzione**, il quale sia in grado di presentare e mostrare azioni e tempi programmati per la gestione del manufatto edilizio. Data però la natura preliminare del progetto in questione, si è decisi di proseguire per questa rendicontazione sempre con una metodologia di **base**, come mostrato all'interno

del *report* prodotto dalla GBCItalia (GBC Italia 2022d, p. 65).

Tale metodologia, infatti, ha permesso una contabilizzazione credibile, seppur sintetica, delle fasi del ciclo di vita B2-B3 con la presa in considerazione di informazioni dell'immobile sia di tipo geometrico (il valore in m² di SLP), sia di impatto unitario (per la rendicontazione della fase B2 si prende in esame un valore di *Embodied Carbon* pari a 10 kgCO₂eq/m²) sia, infine, di rapporti proporzionali (di fatti il valore di *Embodied Carbon* della fase B3 risulta essere, da metodologia, pari al 25% dell'EC_{B2}).

Di seguito sono riportati i valori di impatto ambientale desunti all'interno delle fasi di Manutenzione e Riparazione della *BioCasa Sarotto 2050*.

SLP m ²	f kgCO ₂ eq/m ²	EC B2 kgCO ₂ eq	EC B3 (25% B2) kgCO ₂ eq
198.9	10.0	1 989.2	497.3

Fig.86 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nelle fasi B2-B3

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B2-B3	2 486.5	EC B2-B3	0.25

12.3.3. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI SOSTITUZIONE (B4)

Per quanto concerne il calcolo dell'*Emodied Carbon* della fase B4, sono stati presi in considerazione gli interventi di sostituzioni mirati a ristabilire il perfetto soddisfacimento delle esigenze interne al manufatto edilizio.

Ciò a significato, quindi, di andare a contabilizzare le emissioni legate allo stato di **obsolescenza** tecnologica di alcuni elementi tecnici, calcolando dapprima il fattore definito come "*replacement factor*", il quale stabilisce in maniera sintetica il numero di volte per il quale alcuni elementi vedranno una loro reinstallazione nel corso dello scenario temporale di riferimento (che si ricorda essere pari a 50 anni).

Per la contabilizzazione di questa fase, sono stati presi in considerazione **otto** diverse tipologie di elemento ed esplicitate all'interno della Fig. 87. Nel dettaglio, gli elementi edilizi soggetti ad una nuova installazione nel corso dello scenario temporale di riferimento, sono: il rivestimento ligneo interno delle pareti interne, lo strato di finitura superficiale in intonaco, i serramenti e le pannellature degli infissi esterni, i parapetti interni, la grondaia e infine gli elementi delle porte (siano queste interne che porta garage).

Infine, si ricorda che i valori di *Emodied Carbon* della fase B4 saranno restituiti secondo due differenti scenari (Fig. 89); infatti, poiché il calcolo della B4 si basa anche sulla rendicontazione delle emissioni legate agli scenari di smaltimento (fasi C3-C4) si è preferito riportare tale differenziazione anche all'interno di questa fase, la quale ha riportato delle **lievi** differenze che saranno mostrate in maniera sintetica all'interno di questo paragrafo.

Qualora, invece, vi fosse la necessità di consultare in maniera più approfondita i risultati ottenuti, indagando i contributi di ogni singola fase del ciclo di vita presa in considerazione, si consiglia di visionare l'*Allegato 13*.

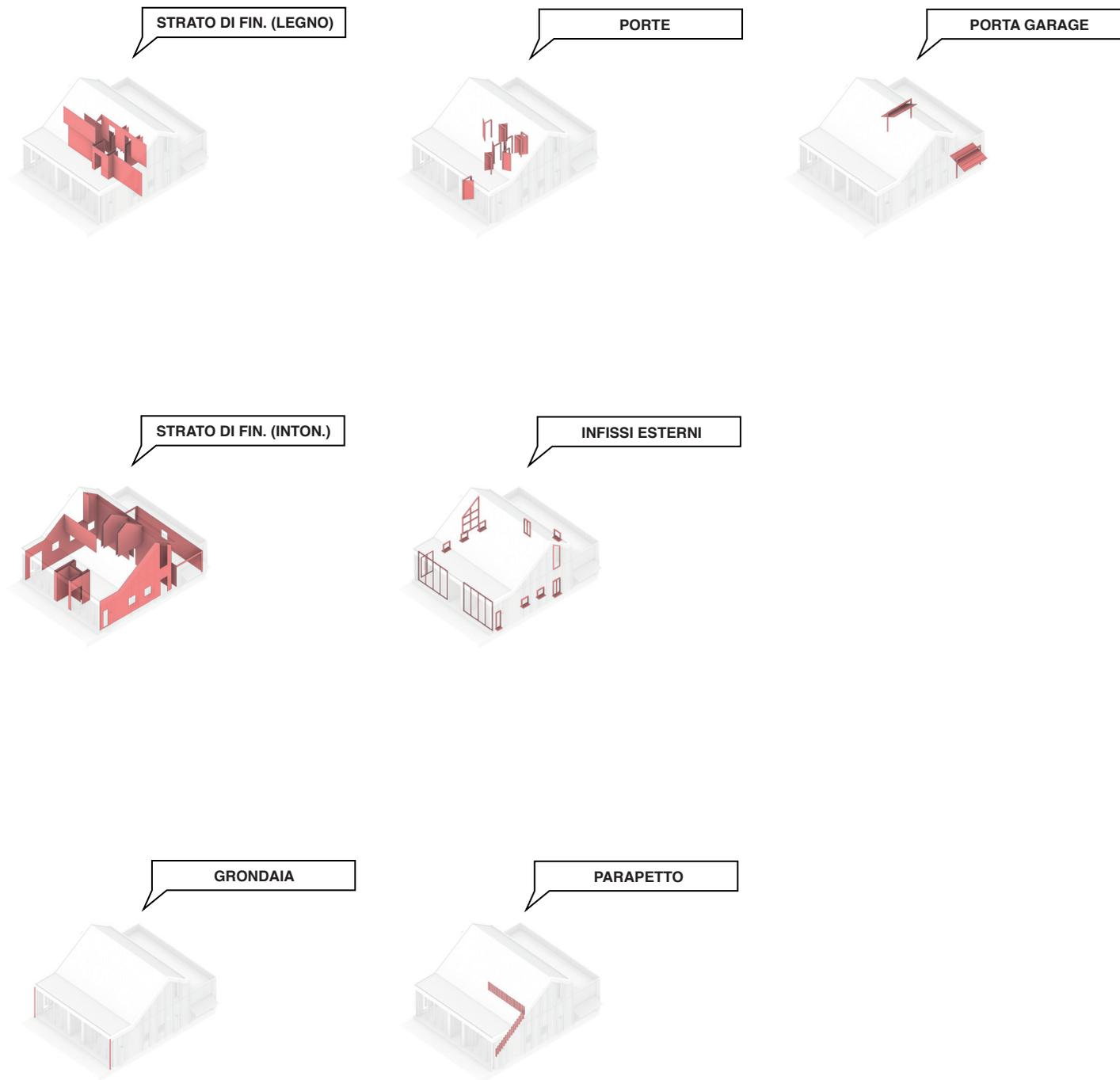


Fig.87 Suddivisione degli elementi edilizi contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon della fase B4

Elementi edilizi	STR	MEL-j	RF _{B4-j}	RF _{B4-j cor.}
<i>Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)</i>	50.0	25.0	1.0	4.0
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	50.0	10.0	4.0	1.0
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	50.0	25.0	1.0	1.0
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	50.0	25.0	1.0	1.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	50.0	10.0	4.0	4.0
<i>Parapetto in legno</i>	50.0	25.0	1.0	1.0
<i>Porte interne in legno</i>	50.0	25.0	1.0	1.0
<i>Porta garage in legno</i>	50.0	25.0	1.0	1.0

Fig.88 Restituzione del "replacement factor" per la sostituzione degli elementi edilizi contemplati

Elementi edilizi	EC B4 S1 kgCO ₂ eq	Elementi edilizi	EC B4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	131.2	<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	28.3
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	1 485.9	<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	1 485.9
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	519.9	<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	509.7
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	1 651.4	<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	1 651.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	259.3	<i>Grondaia in alluminio</i>	259.3
<i>Parapetto in legno</i>	27.9	<i>Parapetto in legno</i>	25.1
<i>Porte interne in legno</i>	708.9	<i>Porte interne in legno</i>	687.2
<i>Porta garage in legno</i>	552.9	<i>Porta garage in legno</i>	544.6
	5 337.3		5 191.5

Fig.89 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase B4 secondo i due scenari considerati

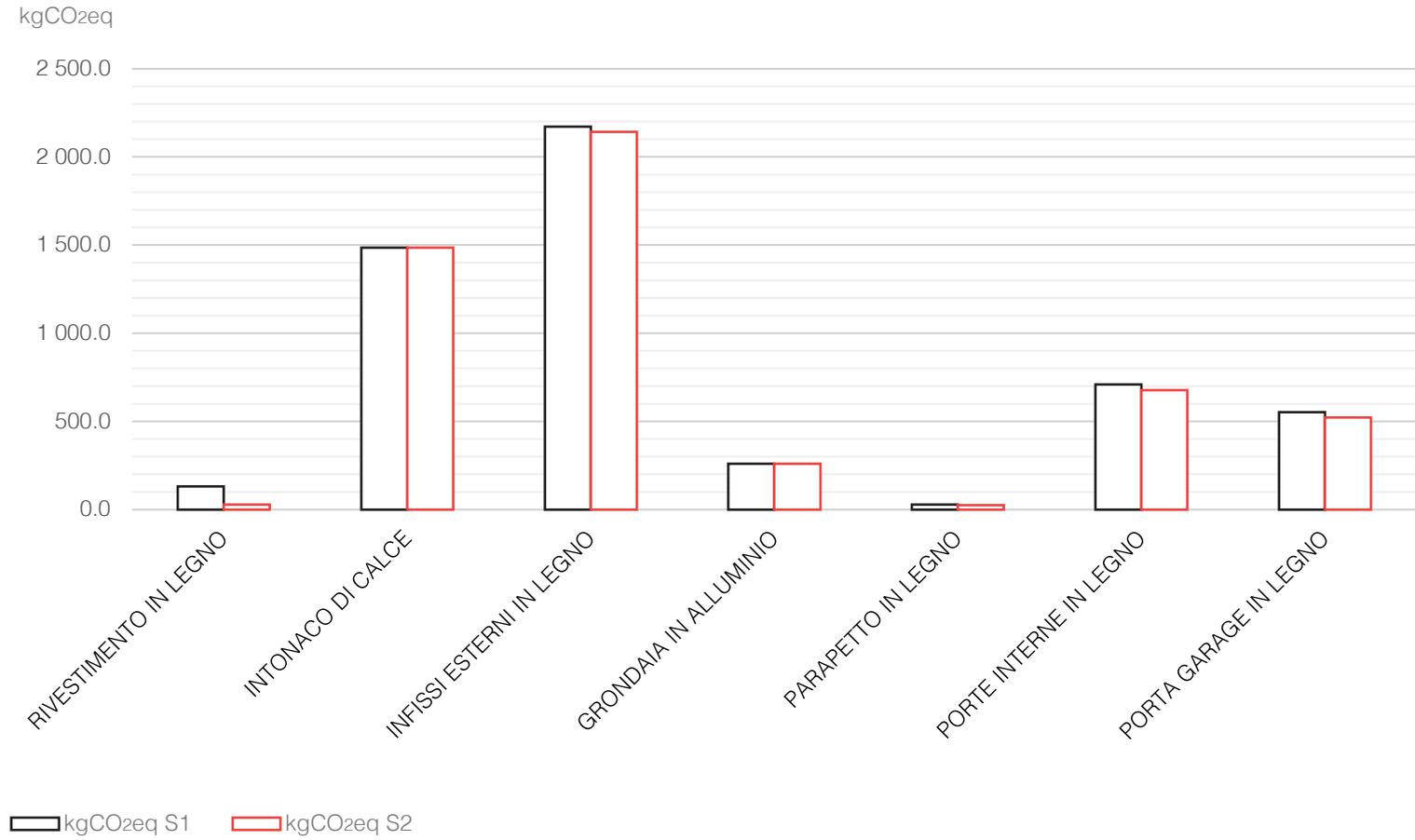


Fig.90 Comparazione secondo i due scenari di smaltimento dei contributi di Embodied Carbon dei principali elementi edilizi individuati

Embodied Carbon (S2 70-30%)	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon (S2 70-30%) (kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B4	5 191.5	0.52
Embodied Carbon (S1 100%)	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon (S1 100%) (kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC B4	5 337.1	0.54

12.4. CONTABILIZZAZIONE DELL'OPERATIONAL CARBON NELLA FASE DI USO (B6-B7)

Per la contabilizzazione delle emissioni di anidride carbonica conseguenti e derivanti dal consumo di energia elettrica è risultata fondamentale, ancora una volta, la collaborazione con l'impresa edile. Infatti, si ricorda che all'interno dell'abitazione sono stati molteplici i consumi presi in considerazione per la contabilizzazione energetica, la quale si interessa di calcolare i **carichi energetici** richiesti sia per la fase di riscaldamento (prendendo in considerazione gli impianti della pompa di calore e del pannello radiante) che i carichi conseguenti alla produzione di acqua calda sanitaria.

Inoltre, grazie alla collaborazione con l'impresa si è potuto procedere ad una puntuale caratterizzazione del calcolo in merito all'*Operational Energy*, riuscendo a prendere in considerazione non solo i consumi energetici dell'abitazione su scala mensile, ma anche i quantitativi di energia **richiesti** mensilmente dal manufatto edilizio alla rete elettrica nazionale. Una volta desunti quindi i consumi elettrici mensili totali (comprensivi sia dell'energia consumata autoprodotta che di quella consumata da rete pubblica), si è proceduti con la progettazione dell'impianto fotovoltaico e il

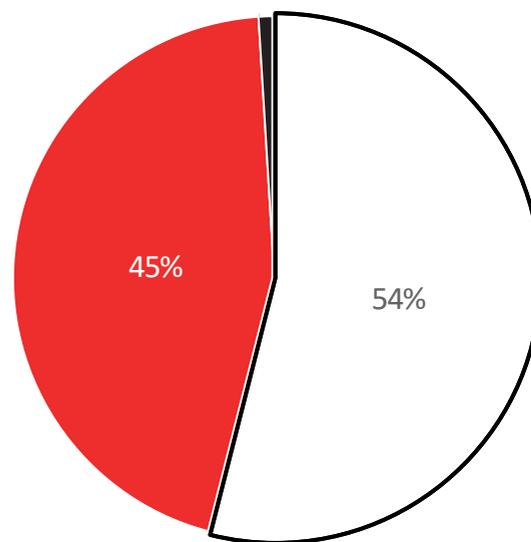
calcolo della sua produzione di energia elettrica.

Per questo specifico punto, si è deciso di adottare come strumento di riferimento per il calcolo il *tool* messo a disposizione dall'Unione Europea *PVgis*, il quale permette, in maniera del tutto intuitiva, di poter desumere (anche su scala mensile) i quantitativi di energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile (European Science Hub 2023). Si tiene inoltre a precisare che la progettazione iterativa dell'impianto fotovoltaico ha mirato alla ricerca della **massimizzazione** dei consumi di energia prodotta da impianto fotovoltaico, al fine di azzerare il quantitativo di energia prelevata da rete elettrica nazionale e in modo di efficientare il più possibile il quantitativo di energia esportata (Fig. 91) che, come viene descritto all'interno del già citato report *LETI*, sarà da intendersi come contributo alla decarbonizzazione della rete nazionale.

Dopo aver desunto questi dati, perciò, si è proseguiti sia con il calcolo sia dell'energia esportata sia di quella auto consumata e prelevata, con l'intento di calcolare l'ammontare finale di *Operational Carbon* il quale, come nel caso precedente del 2007, sarà desunto tramite la conversione dell'*Operational Energy* con un "*carbon factor*", il quale sarà proposto secondo tre date cardini, ovvero: 2022, 2030 e 2050 (Fig. 92). Di seguito si riportano i risultati ottenuti in termini di OC nelle fasi B6 e B7, i

quali mostrano come nell'anno 2022 sia ottenuto un beneficio in termini di EC risparmiata pari a $-20.5 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$, risultato di gran lunga

superiore rispetto a quello riscontrato nel caso della *BioCasa 2007* (in cui si era registrato un risultato di appena $-0.1 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$)



□ Energia autoprodotta consumata ■ Energia autoprodotta esportata ■ Energia da rete elettrica nazionale

	Produzione kWh/mese	Cons. elet. da fonte rinnovabile kWh/mese	Energia esportata kWh/mese	Cons. da rete pub. kWh/mese
<i>Gennaio</i>	1 769.3	1 438.9	330.4	0.0
<i>Febbraio</i>	1 815.5	1 210.1	605.5	0.0
<i>Marzo</i>	2 580.8	1 195.9	1 385.0	0.0
<i>Aprile</i>	2 695.7	1 043.8	1 651.9	0.0
<i>Maggio</i>	2 904.7	1 042.9	1 861.9	0.0
<i>Giugno</i>	2 978.4	1 202.0	1 776.4	0.0
<i>Luglio</i>	3 209.8	1 384.2	1 825.6	0.0
<i>Agosto</i>	3 018.2	1 679.4	1 338.8	0.0
<i>Settembre</i>	2 606.8	1 388.0	1 218.9	0.0
<i>Ottobre</i>	2 002.8	1 128.1	874.8	0.0
<i>Novembre</i>	1 499.3	1 182.3	317.1	0.0
<i>Dicembre</i>	1 605.2	1 887.3	0.0	-282.0
	28 686.7	15 782.4	13 186.3	-282.0

Fig.91 Suddivisione dei contributi energetici prodotti, esportati e consumati dal manufatto in forma sia tabellare che grafica

ENERGIA DA RETE ELETTRICA NAZIONALE

ANNO	E _{agl} , nr kWh	f kgCO ₂ eq/kWh	OC kgCO ₂ eq/anno	OC/m²/anno (kgCO₂eq)/m²/anno
2022	282.0	0.309	3 987.4	0.4
2030	282.0	0.185	2 384.8	0.3
2050	282.0	0.034	441.5	0.0

ENERGIA ESPORTATA

ANNO	E _{agl} , nr kWh	f kgCO ₂ eq/kWh	OC kgCO ₂ eq/anno	OC/m²/anno (kgCO₂eq)/m²/anno
2022	13 186.3	0.309	87.1	-20.5
2030	13 186.3	0.185	52.1	-12.3
2050	13 186.3	0.034	0.6	-2.3

Fig.92 Conversione dei contributi energetici esportati e consumati dal manufatto durante le tre date cardini di riferimento

Operational Carbon 2022	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2022	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-4 074.6	EC B6-B7	-20.5
Operational Carbon 2030	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2030	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-2 437.0	EC B6-B7	-12.3
Operational Carbon 2050	kgCO ₂ eq/anno	Operational Carbon 2050	(kgCO ₂ eq/m ²)/anno
EC B6-B7	-451.1	EC B6-B7	-2.3

12.5. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE DI FINE VITA (C1-C4)

12.5.1. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI DEMOLIZIONE (C1)

Per quanto riguarda la contabilizzazione della fase di Demolizione (C1), si è proceduti tramite l'impiego di una metodologia di base fondata sull'impiego di valori di *Embodied Carbon* unitaria desunti dal database *Ökobaudat*.

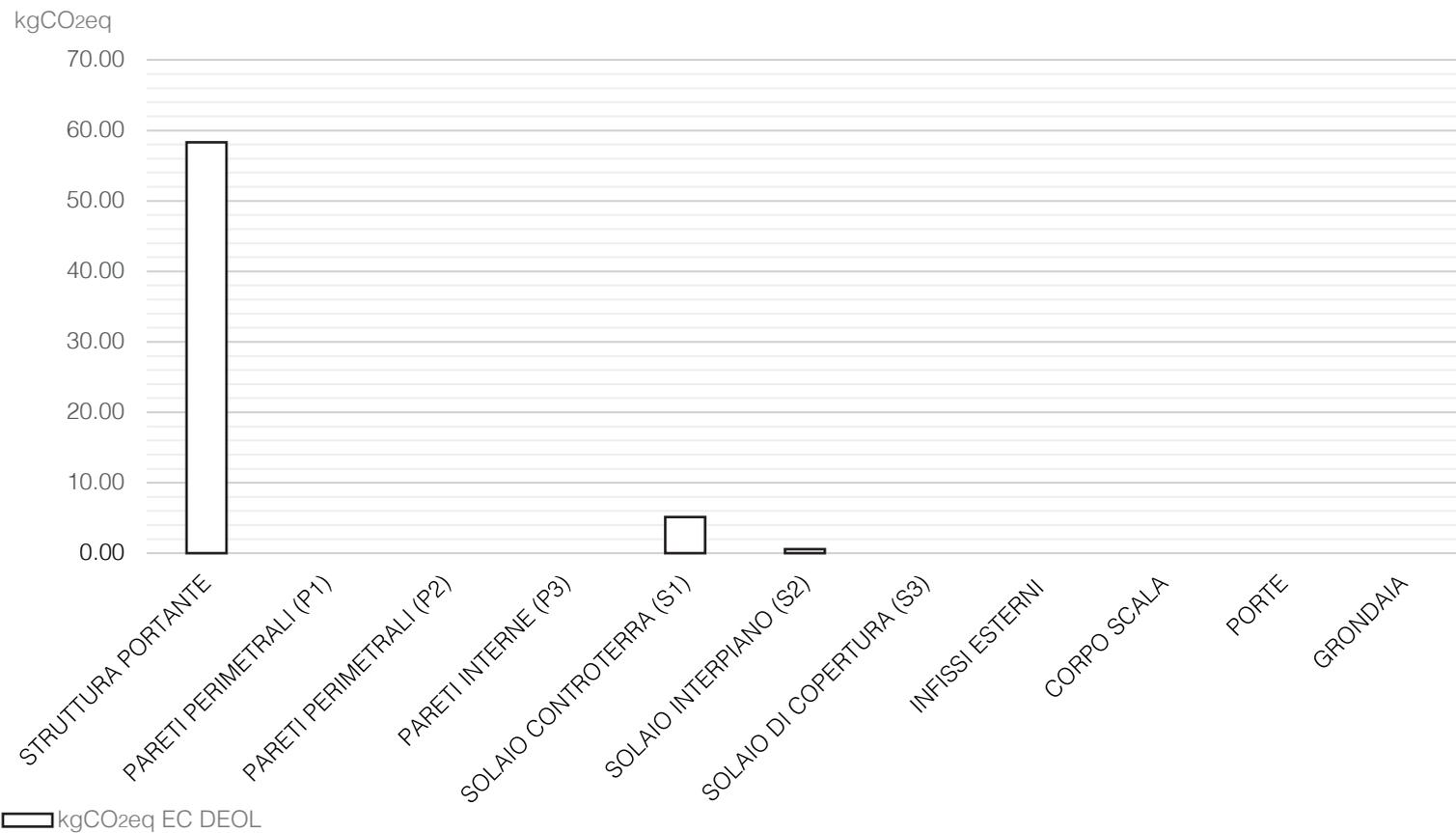
Si ricorda, inoltre, che al fine di poter calcolare il totale dell'anidride carbonica equivalente prodotta dalla demolizione e dalla produzione di rifiuti, sono state tre le **sottoclassi** indagate per la rendicontazione dell'EC_{C1}, ovvero le emissioni correlate a: *Demolizioni di end-of-life*, *Demolizioni d'Uso*, *Demolizioni preliminari*.

Come nel caso precedentemente mostrato, anche qui i risultati di *Embodied Carbon* saranno mostrati secondo una duplice categorizzazione, mostrando i risultati in merito sia alla *Demolizione di end-of-life* che alla *Demolizione d'Uso*, considerando nulli (poiché

assenti) i contributi dati dalla fase di *Demolizioni preliminari* (Fig. 93).

Infine, si ricorda che, qualora si volessero consultare dei risultati maggiormente dettagliati riguardo questa fase del ciclo di vita, può essere consultato l'*Allegato 14*.

Materiali	EC C1DU	EC C1DEOL	EC C1
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
Struttura portante	0.0	58.3	58.3
Pareti perimetrali (P1)	0.0	0.0	0.0
Pareti perimetrali (P2)	0.0	0.0	0.0
Pareti interne (P3)	0.0	0.0	0.0
Solaio controterra (S3)	0.0	5.41	5.41
Solaio interpiano (S2)	0.0	0.59	0.59
Solaio di copertura (S1)	0.0	0.0	0.0
Infissi esterni	0.0	0.0	0.0
Corpo Scala	0.0	0.0	0.0
			64.1



kgCO₂eq EC DEOL

Fig.93 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase C1 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC C1	64.54	EC C1	0.01

12.5.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRASPORTO DEI RIFIUTI (C2)

All'interno di questa parte invece vengono contabilizzate le emissioni di anidride carbonica derivanti le azioni di trasporto dei rifiuti agli opportuni centri di smaltimento.

Per quanto riguarda nel dettaglio questa procedura, si è seguiti in maniera pressoché identica l'iter previsto per la contabilizzazione dell'EC nella fase A4, prevedendo anche in questo caso uno scenario di trasporto esclusivamente **locale** poiché, come spiegato all'interno del paragrafo 10.5.2., si ritengono ancora una volta facilmente smaltibili tutti i materiali previsti dal progetto.

Unica differenza rispetto alla fase di Trasporto A4, si ricorda essere il carico trasportato, il quale non risulterà più corrispondente ai chilogrammi di prodotto definito come di *Bill of quantities* ma, bensì, afferenti ai quantitativi di *Design as built*.

Di seguito, sono riportati in via riassuntiva i valori di ECA4 all'interno della Fig. 94, dalla quale si può chiaramente evincere di come il quantitativo maggiore di Embodied Carbon per il trasporto al cantiere sia appartenente alla struttura portante in calcestruzzo gettato in opera.

Infine, per una consultazione più dettagliata

della fase C2 capace di restituire i singoli valori e parametri di consumo specifico dei mezzi impiegati, si invita a consultare l'*Allegato 15*.

Elementi edilizi	EC C2 kgCO ₂ eq
Struttura portante	2 791.8
Pareti perimetrali (P1)	66.3
Pareti perimetrali (P2)	26.8
Pareti interne (P3)	8.9
Solaio di copertura (S3)	101.3
Solaio interpiano (S2)	71.0
Solaio controterra (S1)	55.5
Infissi esterni	8.5
Corpo Scala	3.6
Porte	5.3
Grondaia	0.2

3 139.4

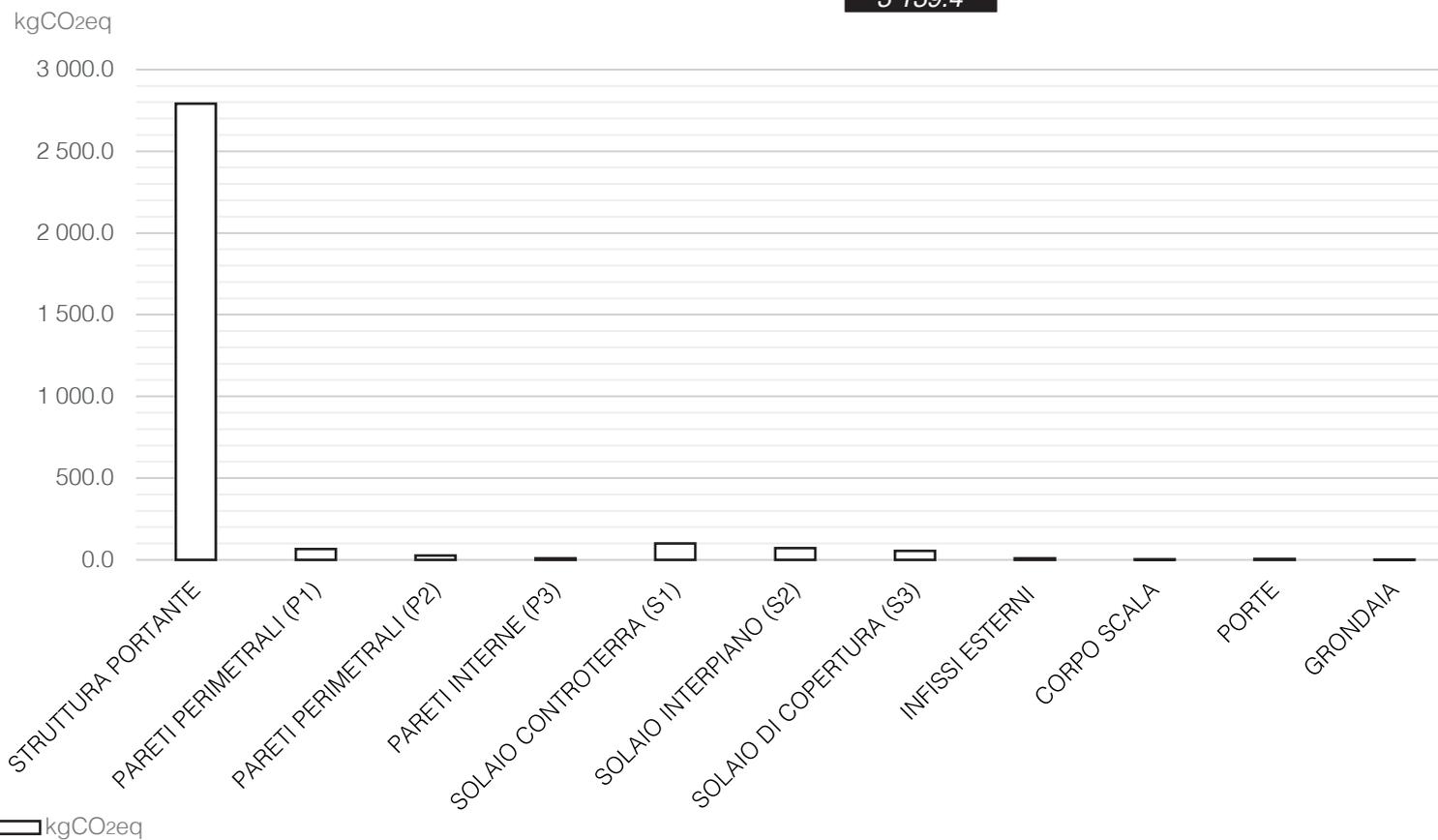


Fig.94 Suddivisione dei contributi di Embodied Carbon nella fase C2 secondo i principali elementi edilizi in via tabellare e grafica

Emodied Carbon	kgCO ₂ eq	Emodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC C2	3 141.5	EC C2	0.32

12.5.2. EMBODIED CARBON DELLA FASE DI TRATTAMENTO DEI RIFIUTI (C3) E SMALTIMENTO (C4)

Per quanto concerne questa fase, come ormai noto, è stato fondamentale dapprima suddividere le tipologie di rifiuti secondo rifiuti o di *Construction Waste*, *Demolition Waste* o di *Replacement Waste*.

Una volta dedotti i chilogrammi di prodotto da smaltire, è stato impiegato ancora una volta il foglio di calcolo inglese BEIS, il quale ha permesso la rendicontazione dell'*Embodied Carbon* della fase C3-C4 secondo due **diversi** scenari di appartenenza, ovvero lo scenario 100% e lo scenario 70-30% i quali differiscono per il tasso di prodotto conferito in discarica.

Una volta dedotti i quantitativi di **anidride carbonica** equivalente derivante la fase di smaltimento, si è proceduti con la contabilizzazione della *Carbon Uptake* degli elementi cementizi.

Tale rendicontazione, ha riproposto nello stesso modo e con la stessa logicità le ipotesi e le **correzioni** a monte del processo metodologico, riproponendone però anche i dubbi e le perplessità in merito ai risultati ottenuti, i quali sono stati esplicitati all'interno del paragrafo 9.5.3. e trattati in maniera specifica all'interno del capitolo "*Interpretazione dei risultati e Conclusioni*" di questo lavoro di Tesi magistrale.

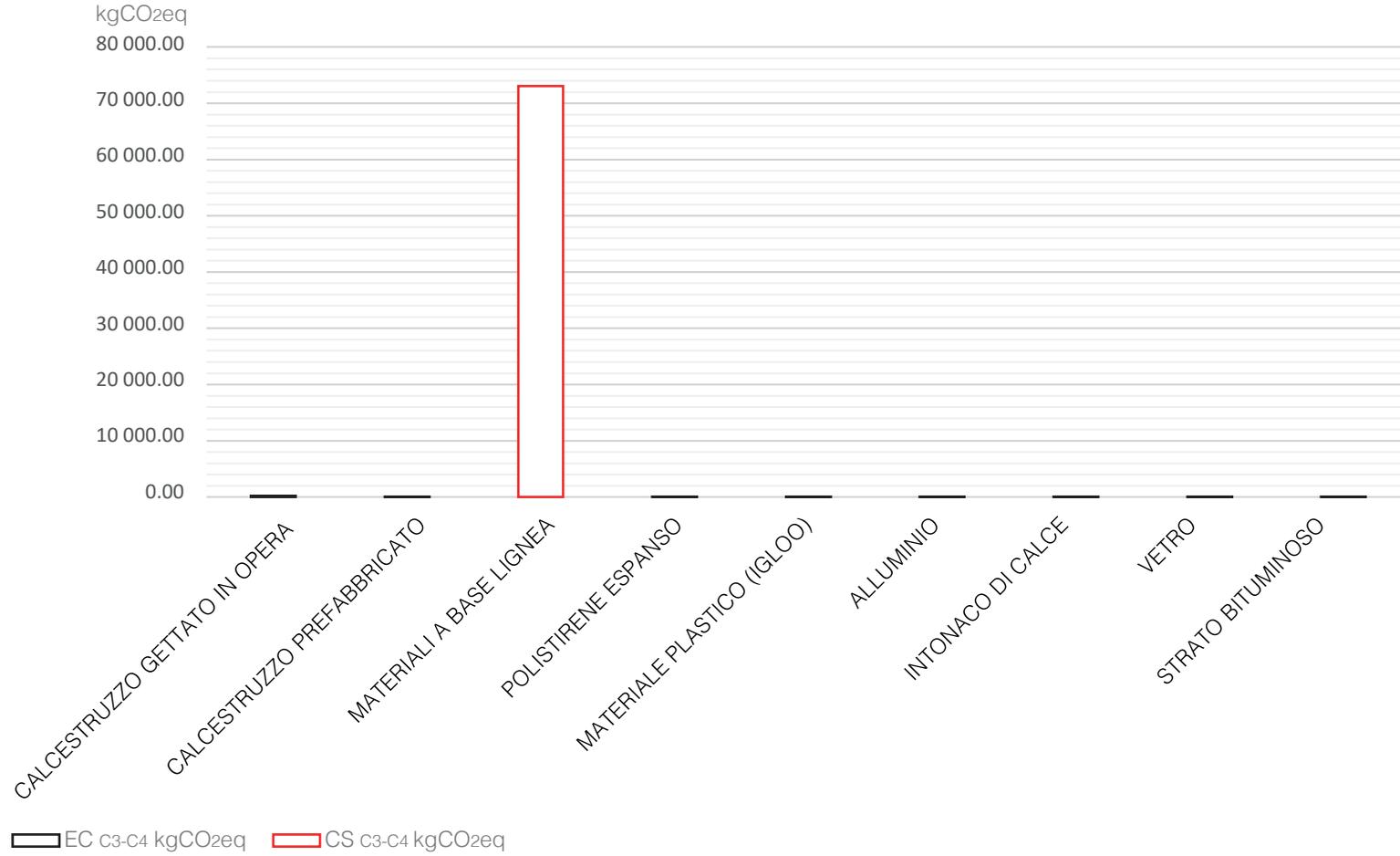
Di seguito, perciò, si condividono in maniera sintetica i risultati ottenuti in tema di *Embodied Carbon* che di *Carbon Uptake* per le fasi C3-C4, chiaramente esplicitati all'interno delle Figure 95-99.

Una lettura più dettagliata e completa della metodologia di calcolo può essere consultata all'interno dell'*Allegato 16*.

N.B. In rosso sono evidenziate le voci che non concorrono alla contabilizzazione della EC_{C3-C4} bensì della CS_{C3-C4}

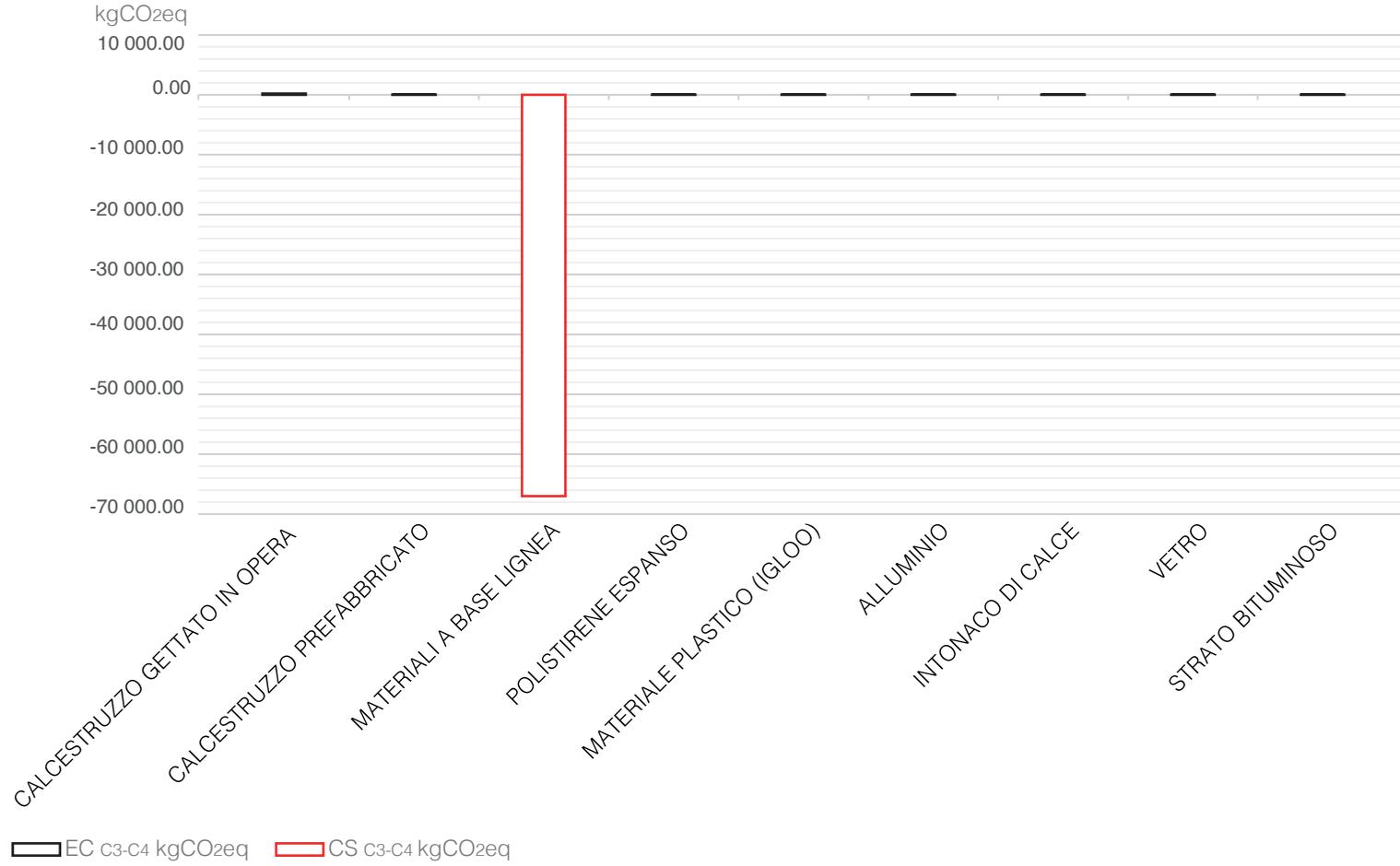
Elementi edilizi	EC C3-C4 S1 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	211.91
<i>Strato di sostegno in cls prefabb.</i>	52.82
<i>Strato portante in X-Lam</i>	54 612.36
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	6.08
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea</i>	5 270.77
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	1 295.55
<i>Strato di sup. e portante in telaio ligneo</i>	2 048.68
<i>Strato di rivestimento superiore ligneo</i>	5 997.05
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	113.40
<i>Porte interne in legno</i>	1 266.46
<i>Porta garage in legno</i>	482.46
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	807.02
<i>Parapetto in legno</i>	163.42
<i>Corpo Scala in legno</i>	1 018.87
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.03
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce</i>	5.61
<i>Strato isolante in XPS</i>	1.26
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	7.84
<i>Strato di riv.sup. in alluminio</i>	0.30
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.91
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.91
	281.6
	73 082.1

Fig.95 Suddivisione dei contributi di EC e CS nella fase C3-C4 secondo i principali elementi edilizi all'interno dello scenario S1 (100%) in via tabellare



Elementi edilizi	EC C3-C4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	209.69
<i>Strato di sostegno in cls prefabb.</i>	42.70
<i>Strato portante in X-Lam</i>	-41 547.14
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	-9 899.07
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea</i>	-4 003.40
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	-965.11
<i>Strato di sup. e portante in telaio ligneo</i>	-1 557.27
<i>Strato di rivestimento superiore ligneo</i>	-4 547.93
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	-1 755.93
<i>Porte interne in legno</i>	-863.22
<i>Porta garage in legno</i>	-363.44
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	-610.25
<i>Parapetto in legno</i>	-124.30
<i>Corpo Scala in legno</i>	-771.36
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.03
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce</i>	5.19
<i>Strato isolante in XPS</i>	1.25
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	15.49
<i>Strato di riv.sup. in alluminio</i>	0.29
<i>Pannellatura in vetro</i>	17.77
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.90
	293.3
	-67 021.2

Fig.97 Suddivisione dei contributi di EC e CS nella fase C3-C4 secondo i principali elementi edilizi all'interno dello scenario S2 (70-30%) in via tabellare



	CU C3-C4 S1 kgCO ₂ eq	CU B1 kgCO ₂ eq	CU C3-C4 S1 f. kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	113 711.0	3 740.5	109 970.5
<i>Struttura portante oriz. a platea in cls gettato in opera</i>	405 476.9	3 740.5	401 736.4
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (7 cm)</i>	51 086.8	0.0	51 086.8
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	29 620.3	2 201.0	27 419.3
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (10 cm)</i>	72 996.9	0.0	72 996.9
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	24 683.6	4 402.0	20 281.6
			-683 491.5

	CU C3-C4 S2 f. kgCO ₂ eq
Carbon Uptake C3-C4 (scenario 70-30%)	-205 047.5

Fig.99 Suddivisione dei contributi di Carbon Uptake nella fase C3-C4 secondo i principali elementi edilizi degli scenari S1 e S2

Emodied Carbon (S2 70-30%) EC C3-C4	kgCO ₂ eq 293.3	Emodied Carbon (S2 70-30%) EC C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 0.03
Emodied Carbon (S1 100%) EC C3-C4	kgCO ₂ eq 281.6	Emodied Carbon (S1 100%) EC C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 0.03
Carbon Uptake (S2 70-30%) Carbon Uptake C3-C4	kgCO ₂ eq -205 047.4	Carbon Uptake (S2 70-30%) Carbon Uptake C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -20.62
Carbon Uptake (S1 100%) Carbon Uptake C3-C4	kgCO ₂ eq -683 491.5	Carbon Uptake (S1 100%) Carbon Uptake C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -68.73
Carbon Sequestration (S2 70-30%) Carbon Sequestration C3-C4	kgCO ₂ eq -67 021.2	Carbon Sequestration (S2 70-30%) Carbon Sequestration C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo -6.74
Carbon Sequestration (S1 100%) Carbon Sequestration C3-C4	kgCO ₂ eq 73 082.1	Carbon Sequestration (S1 100%) Carbon Sequestration C3-C4	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo 7.35

12.6. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE OLTRE IL CICLO DI VITA (D)

Oltre le fasi del ciclo di vita, che attivamente contribuiscono alla definizione di un valore di *Whole Life Carbon*, all'interno di questa rendicontazione si è deciso di andare ad attuare una contabilizzazione anche del livello di **circolarità potenziale** del manufatto edilizio.

Infatti, data la grande differenza in termini materici con il manufatto edilizio precedentemente mostrato, si è cercato anche in questa fase di attuare un confronto tra i valori di *Embodied Carbon* risparmiata desunti, al fine di comprendere (in maniera assolutamente predittiva) la capacità e il livello di circolarità dei due manufatti.

Per quanto riguarda inoltre la metodologia adottata, si ribadisce come l'approccio scelto sia stato un approccio di base, il quale ha associato al quantitativo di prodotto riciclato o reimpiegato un valore unitario di *Embodied Carbon D* desunto da *Ökobaudat*.

Di seguito all'interno della Figura 100, sono mostrati sia per via tabellare sia grafica, i risultati ottenuti per la fase D "oltre il ciclo di vita", in cui si può chiaramente evincere di come il maggior beneficio in termini di EC risparmiata sia connesso ad un riciclo o un reimpiego dei materiali lignei (di cui l'ipotesi progettuale fa largo uso).

Per una trattazione invece più dettagliata si rimanda all'*Allegato 17*.

Elementi edilizi	EC D kgCO ₂ eq
Calcestruzzo gettato in opera	-256.1
Calcestruzzo prefabbricato	-13.3
Materiale plastico (igloo)	-450.7
Materiali a base lignea	-22 857.6
Alluminio	-1 740.7
Vetro	-17.9
Polistirene Espanso	-304.4
	- 25 640.7

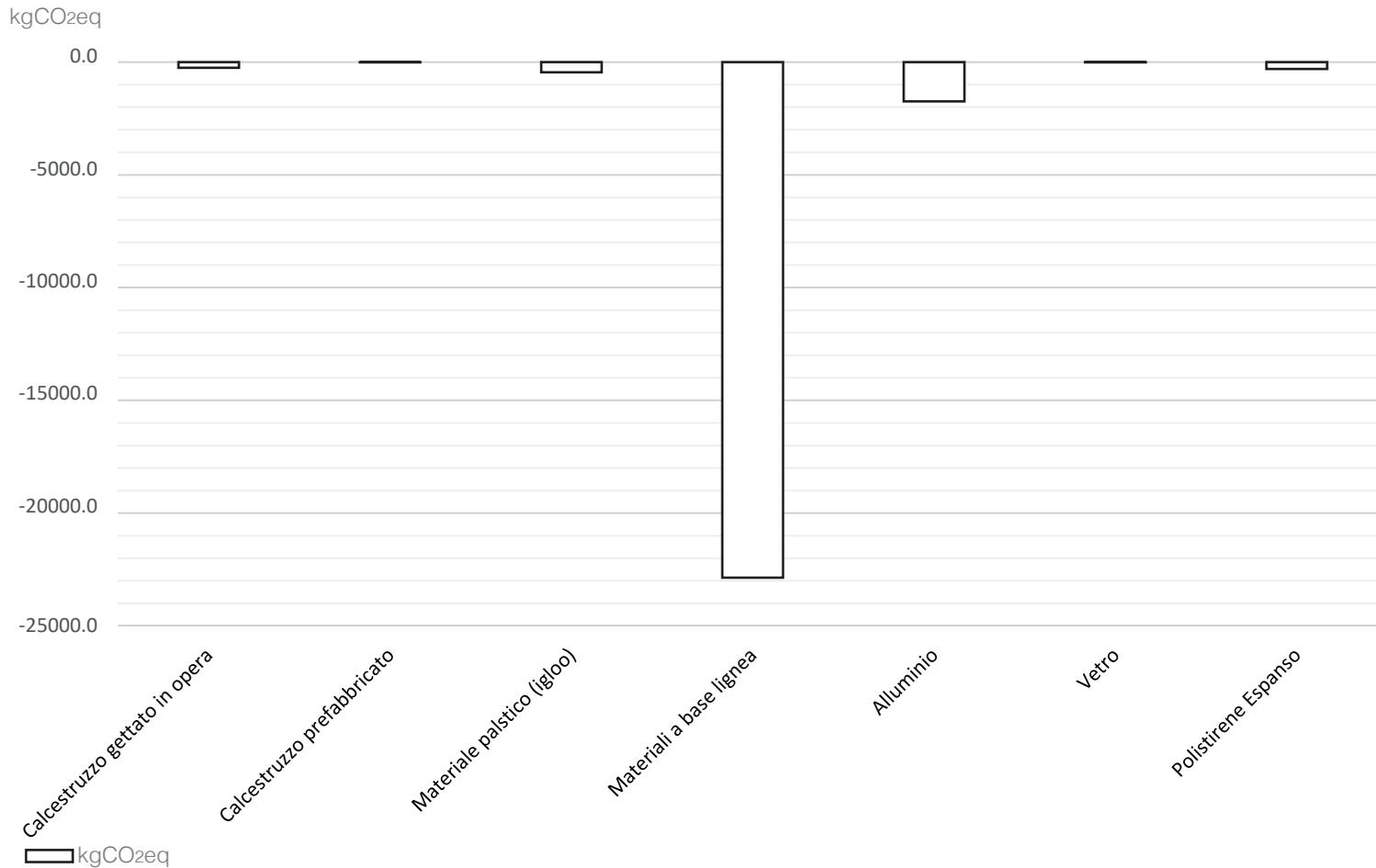


Fig.100 Suddivisione dei benefici apportati (in termini di EC) dal reimpiego di alcuni materiali caratteristici del manufatto in via tabellare e grafica

Embodied Carbon	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC D	-25 636.7	EC D	-2.58

12.7. CONTABILIZZAZIONE DELL'EMBODIED CARBON DI IMPIANTI E SERVIZI

Per la valutazione dell'*Embodied Carbon* propria del sistema di Impianti caratterizzante il manufatto edilizio, si è sostanzialmente seguito in maniera pedissequa la metodologia base mostrata all'interno del paragrafo 10.7., impiegando talvolta anche il database di *Ökobaodat*.

Rispetto alla procedura mostrata precedentemente quindi, non si registrano cambiamenti o mutamenti metodologici. Per quel che concerne invece le componenti impiantistiche (mostrate in Figura 102), queste sono state leggermente modificate al fine di rispecchiare il nuovo progetto ipotizzato. Ciò ha significato, dunque, sia l'eliminazione dei contributi in termini di *Embodied Carbon* dei due pannelli solari sia il calcolo della nuova *Embodied Carbon* afferente all'impianto fotovoltaico, il quale come spiegato all'interno del capitolo 10 vede un aumento nella **capacità** di produzione di energia elettrica e del numero di moduli di pannelli fotovoltaici installati (si ricorda che al fine di efficientare al massimo l'autoconsumo e l'energia esportata, l'impianto risulta ora possedere una potenza di picco da 18,2 kWh).

Oltre queste due doverose precisazioni,

la metodologia e soprattutto le altre componenti impiantistiche, risultano essere immutate nei confronti della prima rendicontazione.

Di seguito, perciò saranno mostrati i risultati ottenuti in termini di *Embodied Carbon* dal lato impiantistico dell'abitazione, una trattazione più profonda circa le procedure di calcolo può essere invece ritrovata all'interno dell'*Allegato 18*.

Componenti di impianto	Peso kg	pz. -	Peso tot. kg
<i>Pannello fotovoltaico</i>	19.0	44.0	836.0
<i>Pompa di calore</i>	58.6	1.0	58.6
<i>Storage termico</i>	59.5	1.0	59.5
<i>Pavimento radianti</i>	338.1	1.0	338.1

1 292.2

Fig.101 Suddivisione degli elementi e dei loro rispettivi pesi contemplati per la rendicontazione dell'Embodied Carbon

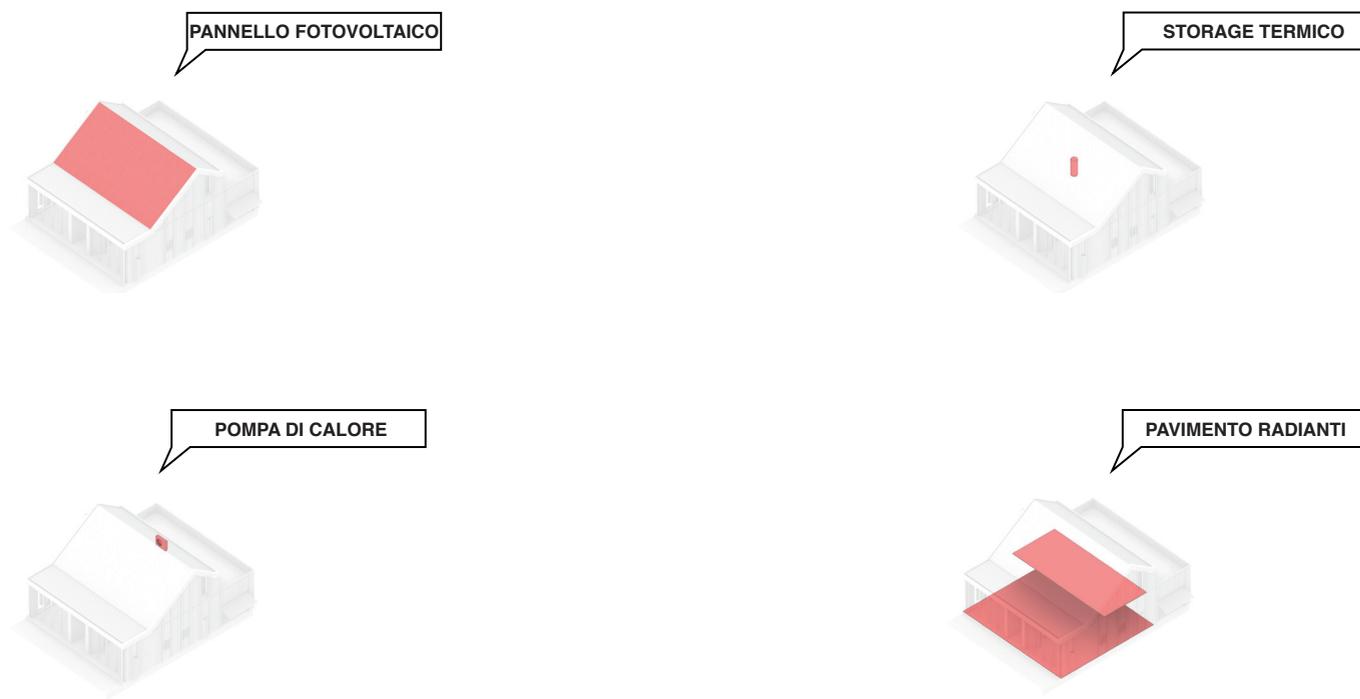


Fig.102 Suddivisione delle componenti di impianto contemplate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon del sistema MEP

Embodied Carbon	kgCO ₂ eq	Embodied Carbon	(kgCO ₂ eq/m ²)/annuo
EC MEP	45 894.7	EC MEP	4.61

12.8. DETERMINAZIONE DELLA WHOLE LIFE CARBON

All'interno di questo ultimo paragrafo, si condividono i risultati ottenuti in termini di *Whole Life Carbon* dal manufatto edilizio oggetto di studio, ricordando innanzitutto come il valore conseguito di *WLC* sia un valore comprensivo di tutte le fasi che vanno dalla fase A1 alla fase C4.

All'interno di questa rendicontazione, poi, non sono soltanto stati presi in considerazione i valori "attivi" di *Embodied Carbon*, dove per attivi si intende indicare i valori positivi di *EC*, ma anche e soprattutto tutti i valori **negativi** di *Embodied Carbon* risparmiata dovuti ai fenomeni, più volte citati, di *Carbon Uptake* e *Carbon Sequestration*.

Come però nel caso precedente, anche qui, si tiene a specificare e precisare la perplessità di tali contributi che seppur validi e assolutamente necessari da contabilizzare, risultano molto spesso essere **sproporzionati** nei confronti dei risultati ottenuti precedentemente e quindi colpevoli in qualche misura di far risultare come **estremamente** convenienti sotto il punto di vista ambientale gli interventi architettonici.

Si tiene anche qui a far notare, come sia nuovamente fraintendibile la lettura dei risultati ottenuti che vedono una "convenienza"

maggiore per lo scenario 100%, il quale risulta essere la scelta migliore a seguito dello sconto effettuato con il 100% della carbonatazione calcolata nelle fasi C3-C4.

Ulteriori commenti in merito a tale punto, si ricorda, saranno effettuati all'interno del capitolo sulle *Conclusioni*, in cui sarà effettuato non solo un commento generale sulle problematiche riscontrate nell'attuazione della metodologia ma si produrrà anche un confronto tra i risultati ottenuti dai due progetti analizzati.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti, in forma tabellare e grafica, dal progetto *BioCasa Sarotto 2050* sia a cadenza annuale (secondo le tre *milestones* 2022, 2030 e 2050) sia secondo l'unità m²/anno (Fig. 103).

In Figura 103 (p. 222), vengono mostrati i singoli apporti in termini di *EC* afferenti alle singole fasi del ciclo di vita contabilizzate (in forma di istogrammi e normalizzati al m²/anno). Come si può evincere chiaramente da questa figura, i contributi sia di *CS* sia di *CU* sono risultati assolutamente fondamentali ai fini di una restituzione negativa del bilancio finale di *WLC*.

Si specifica infine, che tale bilancio di *WLC* risulta essere del tutto conforme alle formule [20], [21] e [21a] mostrate per la rendicontazione del bilancio di *Whole Life Carbon* all'interno del paragrafo 6.9. a pagina 98 e 99.

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 **-8 680.3**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2022 **-15 444.9**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 **-43.642**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2022 **-76.652**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2030 **-7 042.7**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2030 **-13 807.3**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2030 **-35.408**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2030 **-69.418**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2050 **-5 056.9**

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2050 **-11 821.4**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2050 **-25.424**

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 1 100%) 2050 **-59.434**

Fig.103 Suddivisione dei risultati di WLC raggiunti all'interno delle tre date cardini prese in considerazione (2022, 2030, 2050)

WLC BIOCASA 2050

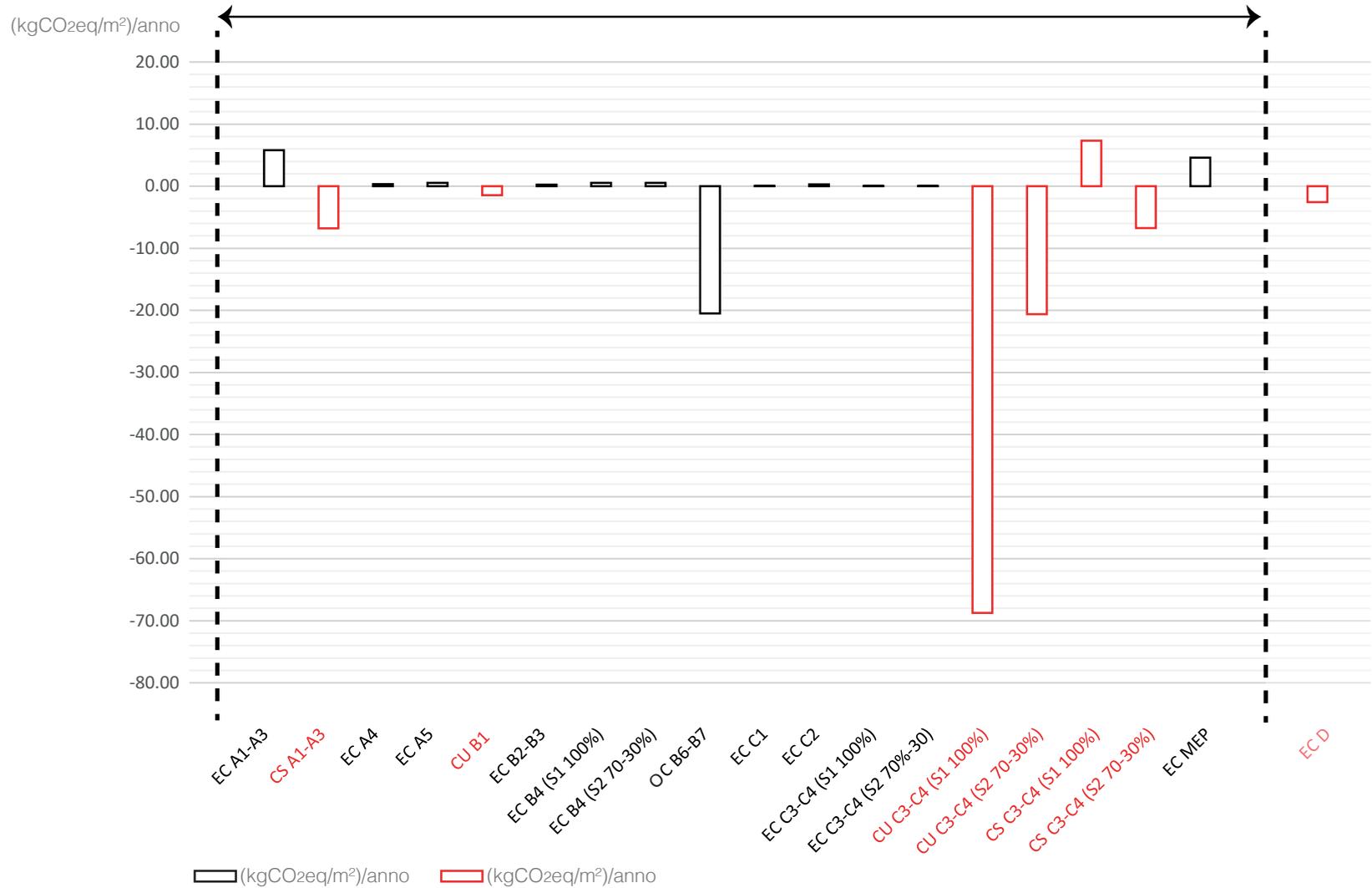


Fig.104 Suddivisione dei contributi di EC, CS, CU durante il ciclo di vita del manufatto edilizio di ogni singola fase analizzata (attualizzati all'anno 2022)

13. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Il lavoro di Tesi si è posto l'obiettivo generale di esplorare e applicare la metodologia di valutazione *Whole life Carbon* (WLC) per contabilizzare le emissioni di anidride carbonica equivalente su un caso di studio (*Biocasa Sarotto 2007*) realizzato dalla Sarotto Group presso Narzole (CN).

Tale metodologia, come già illustrato nel Capitolo 6, risulta essere uno strumento **fondamentale** per il perseguimento di decarbonizzazione del settore delle costruzioni, operando sul controllo e la gestione degli impatti ambientali di un oggetto complesso come un manufatto edilizio.

L'esperienza di ricerca è stata strutturata

attraverso lo studio di un'ampia selezione di documenti e report scientifici; tra questi, vale la pena menzionare l'allegato 4 *Strumenti per la decarbonizzazione* (GBCItalia, 2023d) contenuto all'interno della *Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050* prodotta dal *Green Building Council Italia*.

La Tesi si è quindi avvalsa di tale documento per comprendere e valutare le emissioni di gas climalteranti del manufatto edilizio oggetto di studio. Più nel dettaglio, è stato operato un **bilancio** di tutte le fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio (WLC); dalla produzione dei materiali, prodotti e componenti (A1-A3) impiegati per la costruzione dell'edificio (A4-A5), alle fasi connesse al suo utilizzo

(B1-B7), concludendo poi con una contabilizzazione delle emissioni a fine vita (C1-C4). Le diverse fasi oggetto di analisi sono state caratterizzate attraverso due indicatori: *Operational Carbon* ed *Embodied Carbon*. Il primo afferente alle emissioni che caratterizzano il funzionamento del manufatto edilizio (B6 e B7), il secondo invece a tutte le restanti fasi del ciclo di vita del progetto.

È opportuno poi precisare che, in riferimento all'*Embodied Carbon*, la Tesi ha approfondito alcune tematiche relative a specifici materiali da costruzione. Più nel dettaglio, sono state esplorate le modalità di **contabilizzazione** della *Carbon Sequestration* dei prodotti a base legno (si veda BOX 1) e della *Carbon Uptake* dei prodotti a base cemento e calce.

La Tesi è poi stata caratterizzata dalla proposta originale di riprogettazione della *Biocasa Sarotto 2007*, al fine di allinearla alle politiche di decarbonizzazione previste per il 2050. Tale operazione, sulla base degli esiti della valutazione WLC sul caso di studio realizzato nel 2007, ha proposto soluzioni di intervento progettuale di tipo materico e impiantistico capaci di azzerare le emissioni di anidride carbonica equivalente. Il progetto 2050 si è dimostrato **coerente** con le finalità stabilite dalla Tesi, dimostrando la possibilità di ridurre, e in alcuni casi “negativizzare”, il bilancio WLC di un manufatto edilizio.

La Tesi di ricerca è stata poi anche un’opportunità di indagare lo stesso sistema di valutazione, attraverso una revisione critica in grado di evidenziarne i pro e i contro. Infatti, la comparazione tra i valori di WLC della *Biocasa*

Sarotto 2007 con il progetto *2050* ha messo in mostra alcuni ostacoli connessi alla stessa metodologia di contabilizzazione. In particolare, le criticità si riscontrano nel conteggio delle emissioni dei prodotti a base **legno** (ossia la *Carbon Sequestration*) e dei prodotti a base **cemento** (ovvero la *Carbon Uptake*).

In relazione alla *Carbon Uptake*, la Tesi ha rilevato alcune problematiche connesse alla fase di smaltimento rifiuti (C3-C4), mentre per quanto concerne la fase d’uso (B1) è possibile attenersi alle indicazioni presenti nel documento di riferimento. Il calcolo della CU_{C3+C4} , impiegato per la valutazione dei due manufatti, si basa su una procedura di contabilizzazione che tende a promuovere l’impiego di prodotti a base cemento.

Infatti, la metodologia prevede di contabilizzare tutti i **benefici** derivanti dalla demolizione del calcestruzzo nel medesimo ciclo di vita del manufatto edilizio (attraverso un’operazione di attualizzazione all’anno della demolizione), nonostante questi avvengano in un periodo di tempo che si estende ben oltre il periodo di valutazione della WLC (pari a cento anni).

Nel dettaglio, sebbene sicuri della capacità del calcestruzzo di assorbire la CO_2 presente in atmosfera in seguito ai fenomeni di carbonatazione, si ritiene tale considerazione fortemente critica ai fini di una rendicontazione finale. Infatti, la *Carbon Uptake* C3-C4 non può essere un beneficio ascrivibile (e quindi rendicontabile) al bilancio WLC del manufatto in questione ma, semmai, riconducibile a **futuri processi di riuso** (nel caso, ad esempio, di blocchi) o di riciclo (come nel caso di aggregati

per nuovi componenti edilizi) che, essendo successivi al fine vita, necessitano di essere contabilizzati all'interno della fase D (oltre il ciclo di vita), definita anche: *Circular Economy*. Si evidenzia poi il paradosso che accompagna la contabilizzazione della CU_{C3-C4} . Infatti, come si evince dagli esiti della WLC dei due manufatti (si veda i paragrafi 10.8. e 12.8.), un maggior beneficio in termini di captazione di anidride carbonica è **direttamente** proporzionale ai quantitativi di rifiuti a base cemento posti a discarica, poiché una maggiore quantità determina un incremento del potere di captazione della CO_2 .

Proprio tale passaggio innesca quindi il paradosso: affinché una valutazione WLC più bassa possibile i progettisti e i valutatori potrebbero essere **involontariamente** incentivati a non riciclare i prodotti in calcestruzzo, ma a disporli tutti in discarica, implicando in questo modo anche impatti ambientali che vanno ben oltre la singola emissione di gas climalteranti, come ad esempio il consumo di suolo.

Infine, è necessario precisare come alcuni parametri e procedure per la contabilizzazione CU, con particolare riferimento alla fase di fine vita ($C3+C4$), siano ad oggi in fase di studio e sviluppo e, pertanto, contraddistinti da una momentanea **scarsa** affidabilità del dato (M. Kazemian, B. Shafei 2023). Ne consegue che l'impiego di tali procedure per la valutazione del fine vita debba essere limitato, o quantomeno compartimentato alla fase D (*Circular Economy*), al fine di non influenzare in maniera eccessiva (sia termini positivi che negativi) il risultato della *Whole Life Carbon*.

La *Carbon Sequestration*, in maniera

analogha a quanto illustrato per la CU_{C3-C4} , richiede di separare i risultati dal bilancio WLC. Tuttavia, il lavoro di Tesi ha evidenziato la necessità di contabilizzare i valori di CS in maniera indipendente al sistema WLC sia per la fase A1-A3 sia per la fase C3-C4, data la forte relazione che lega i due valori. Infatti, anche il carbonio stoccato dagli elementi a base legno è da ritenere come un vantaggio impiegabile per la realizzazione di **nuovi** elementi e non come quantitativo che può contribuire ad una diminuzione (o ad un aumento) della *Whole Life Carbon* del manufatto edilizio.

A supporto di tale tesi il RICS, all'interno del documento *Whole life carbon assessment for the built environment* (RICS 2023, p. 190), definisce come l'ammontare di CS è da intendersi più come un impatto o un beneficio in termini di CO_2 concretizzabile **oltre** il ciclo di vita (D) del manufatto e, per questo motivo, da contabilizzare anch'esso nella *Circular Economy*.

Il lavoro di Tesi propone quindi un aggiornamento dell'equazione per il bilancio WLC, attraverso l'esclusione dei contributi CU_{C3+C4} e CS_{C3+C4} , CS_{A1-A3} (si vedano le Figure 105 e 106 a pagina 228 e 229).

In tal senso, la valutazione WLC si esplica secondo la seguente formula [25] che sostituisce la formula [20] (p. 98) impiegata nelle procedure di calcolo dei Capitoli 10 e 12.

$$[25] \text{ WLC} = \sum_{j=1}^n [EC_{A1+A3} + EC_{A4} + EC_{A5}] + \sum_{j=1}^n [(-CU_{B1}) + EC_{B2+B3} + EC_{B4} + EC_{B6+B7}] + [EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}] + EC_{MEP}$$

[kgCO₂eq]

L'impiego della nuova formula ha comportato, naturalmente, una **variazione** nei valori di WLC, sia per il caso studio "2007" sia per quello "2050".

Se nel caso studio *BioCasa 2050* il calcolo della *Whole Life Carbon*, tramite metodologia originariamente adottata (si veda la formula [20]), aveva portato ad un valore complessivo di WLC **negativo** pari a $-43,64 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$ (per lo scenario di smaltimento 70-30%), ora, sulla base del nuovo algoritmo [25] per il bilancio della WLC, i risultati in termini di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (seppur rimanendo negativi) registrano una **variazione**, la quale porta ad un valore conclusivo di WLC, attualizzato al 2022, pari a $-9,513 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$.

Al contrario, il caso della *BioCasa 2007*, in virtù di un largo impiego di prodotti a base cemento e di isolanti a base di polistirene espanso, risulta avere un valore di WLC **positivo** e pari a $9,006 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$ (a seguito dell'introduzione della formula [25]), a differenza di quanto riscontrato precedentemente all'interno del capitolo 10, in cui originariamente la WLC del manufatto edilizio restituiva un valore complessivo, in termini di $\text{CO}_{2\text{eq}}$, negativo e pari a $-17,686 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$. Tale variazione, sostanzialmente dovuta dall'assenza dei contributi negativi di $\text{CS}_{\text{A1-A3}}$, $\text{CS}_{\text{C3-C4}}$, $\text{CU}_{\text{C3-C4}}$, **impedisce** di fatto al caso studio di Narzole di poter essere considerato come un edificio a *Net Zero Whole Life Carbon* (BPIE 2022c, p. 11) (per la definizione, si veda il paragrafo 3.2. a pagina 30).

Quindi, come si può evincere dalla Figura 108 a pagina 231, attraverso un'**implementazione** del comparto tecnico

per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile per la fase di Uso (B6-B7) e grazie ad un utilizzo **maggiore** di componenti edilizi caratterizzate da un minor quantitativo di *Embodied Carbon* (soprattutto per la fase di produzione A1-A3), il progetto *BioCasa Sarotto 2050*, permette l'ottenimento di una *Whole Life Carbon*, normalizzata al m^2/anno (secondo uno scenario temporale di riferimento pari a 50 anni), in linea con i **target** europei contenuti all'interno della *Roadmap* per la decarbonizzazione del settore edilizio, in cui è espressa la necessità di ottenere un parco immobiliare a zero WLC entro il 2050.

Per quanto concerne, invece, i risultati ottenuti dal manufatto edilizio *BioCasa Sarotto 2007*, questi sono da considerarsi ugualmente soddisfacenti, seppur positivi nella loro **ultima** restituzione.

Infatti, se si paragona il risultato di WLC (attualizzato al 2022) della *BioCasa Sarotto 2007* con la *roadmap* di decarbonizzazione del settore edilizio prodotta dal governo **danese** (Ministry of the interior and housing 2021), è possibile notare come esso sia in realtà prossimo ai valori di target danesi per il 2023 ($\text{WLC BioCasa Sarotto 2007} = 9,006 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$, Valore di target danese = $8 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{anno}$).

Inoltre, in Figura 107, si può notare un *comparison* tra i profili WLC dei due differenti progetti. All'interno di questa figura, si può chiaramente evincere di come la fase di *Operational* sia risultata determinante per l'ottenimento (nel caso della *BioCasa 2050*) di un manufatto edilizio a emissioni di anidride carbonica equivalente **negative**.

WLC BIOCASA 07

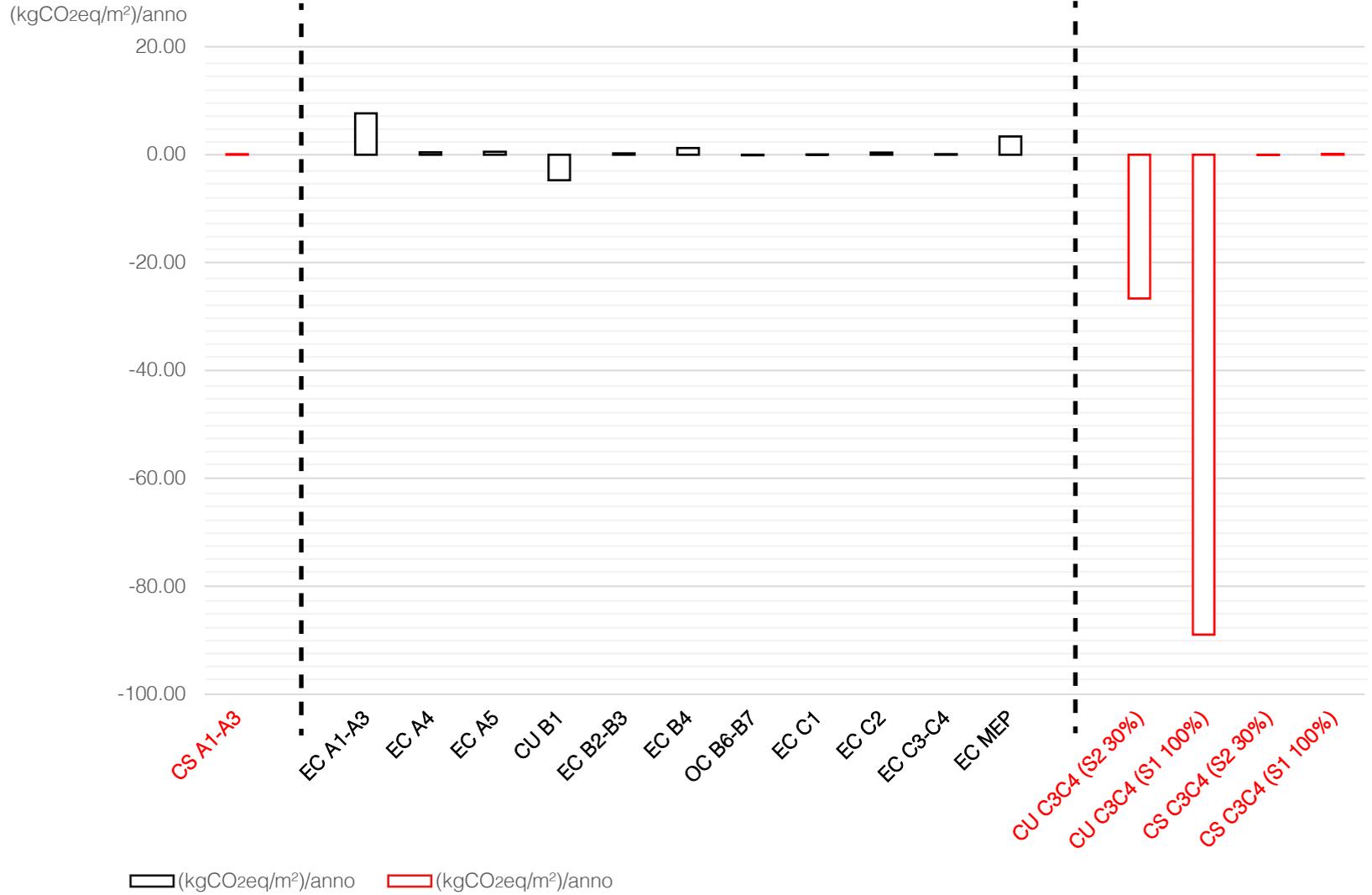


Fig. 105 Suddivisione dei contributi e dei benefici contabilizzati per la nuova rendicontazione della WLC (Biocasa Sarotto 2007)

WLC BIOCASA 50

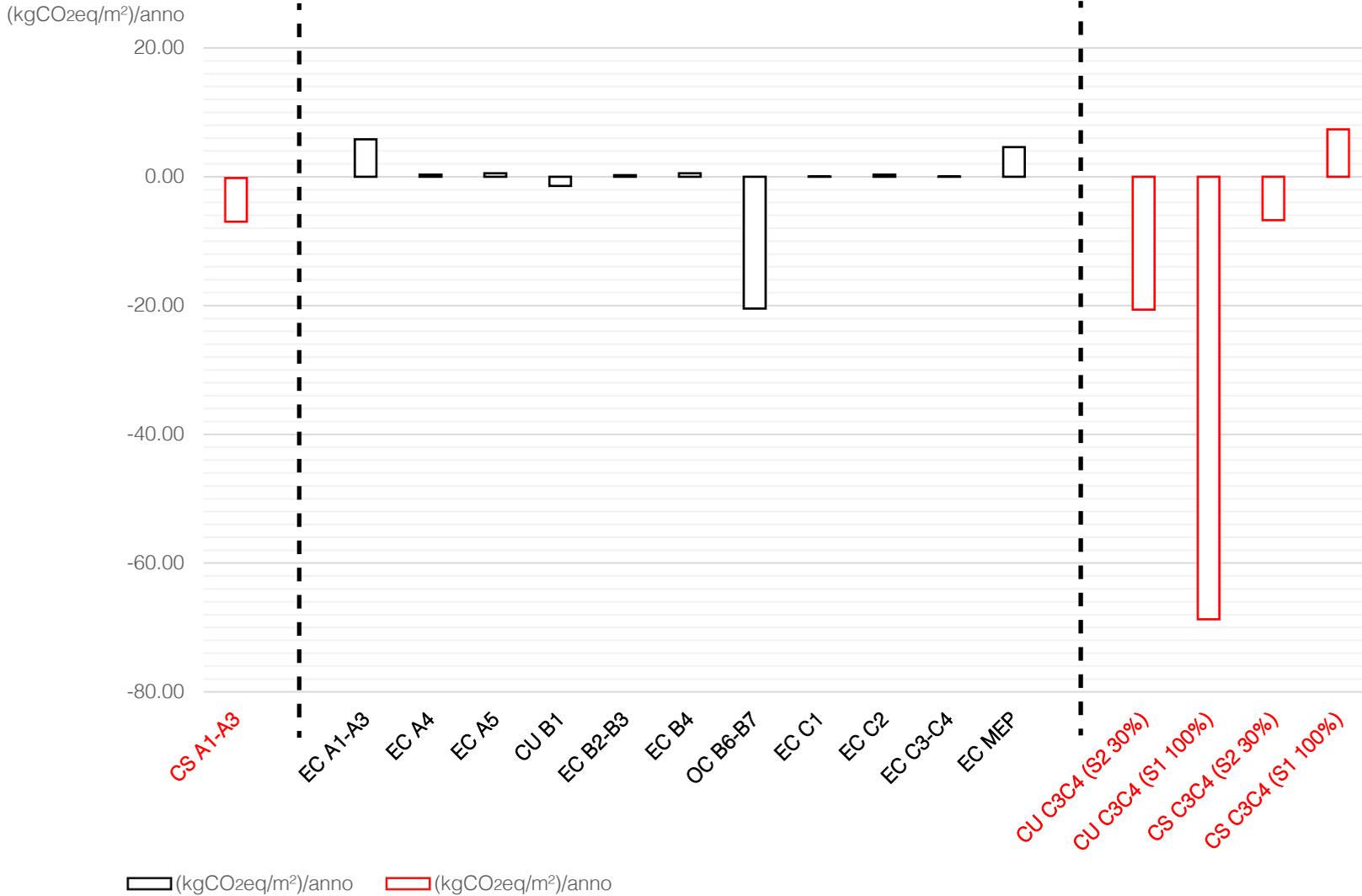


Fig. 106 Suddivisione dei contributi e dei benefici contabilizzati per la nuova rendicontazione della WLC (Biocasa Sarotto 2050)

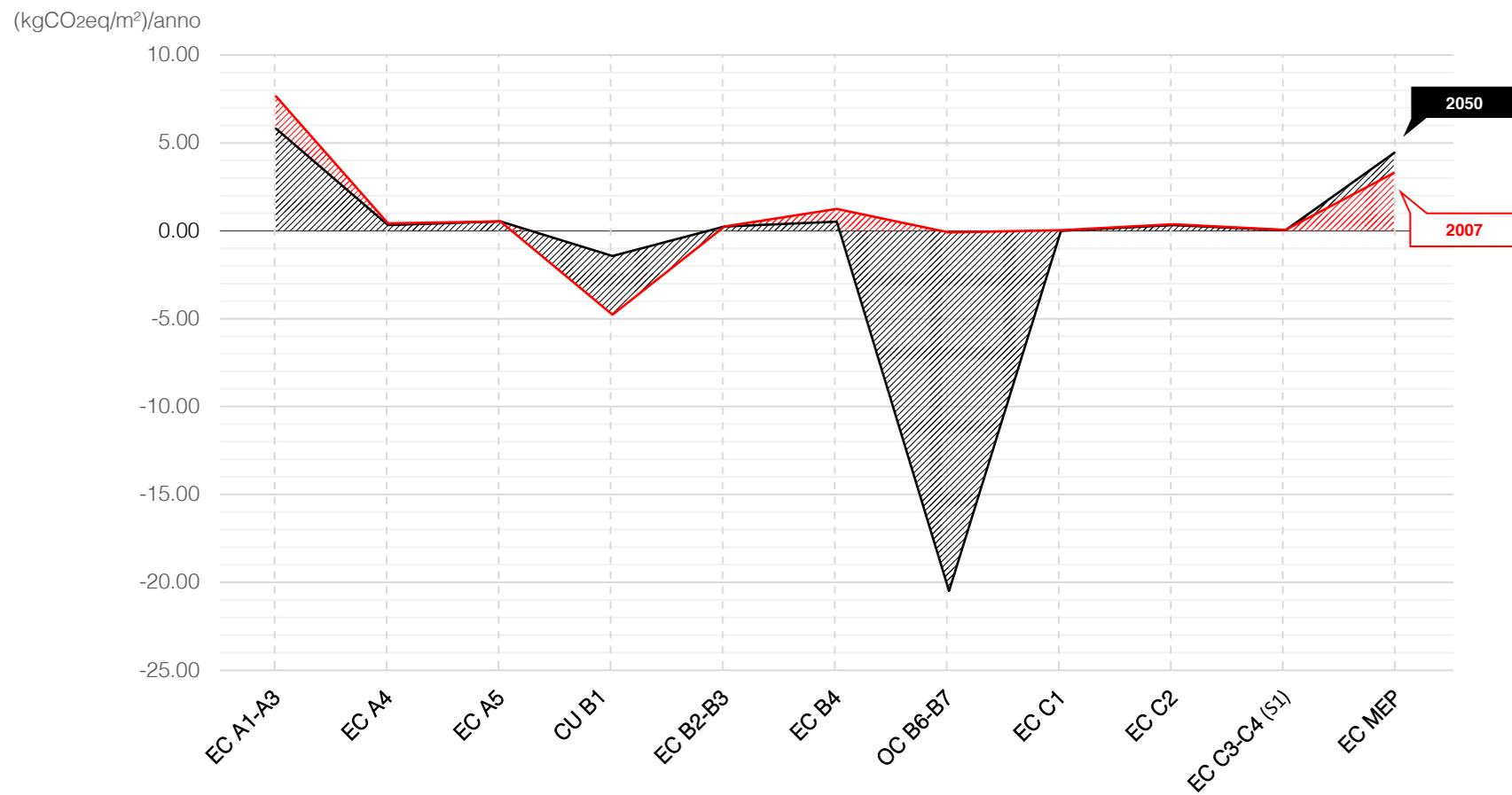
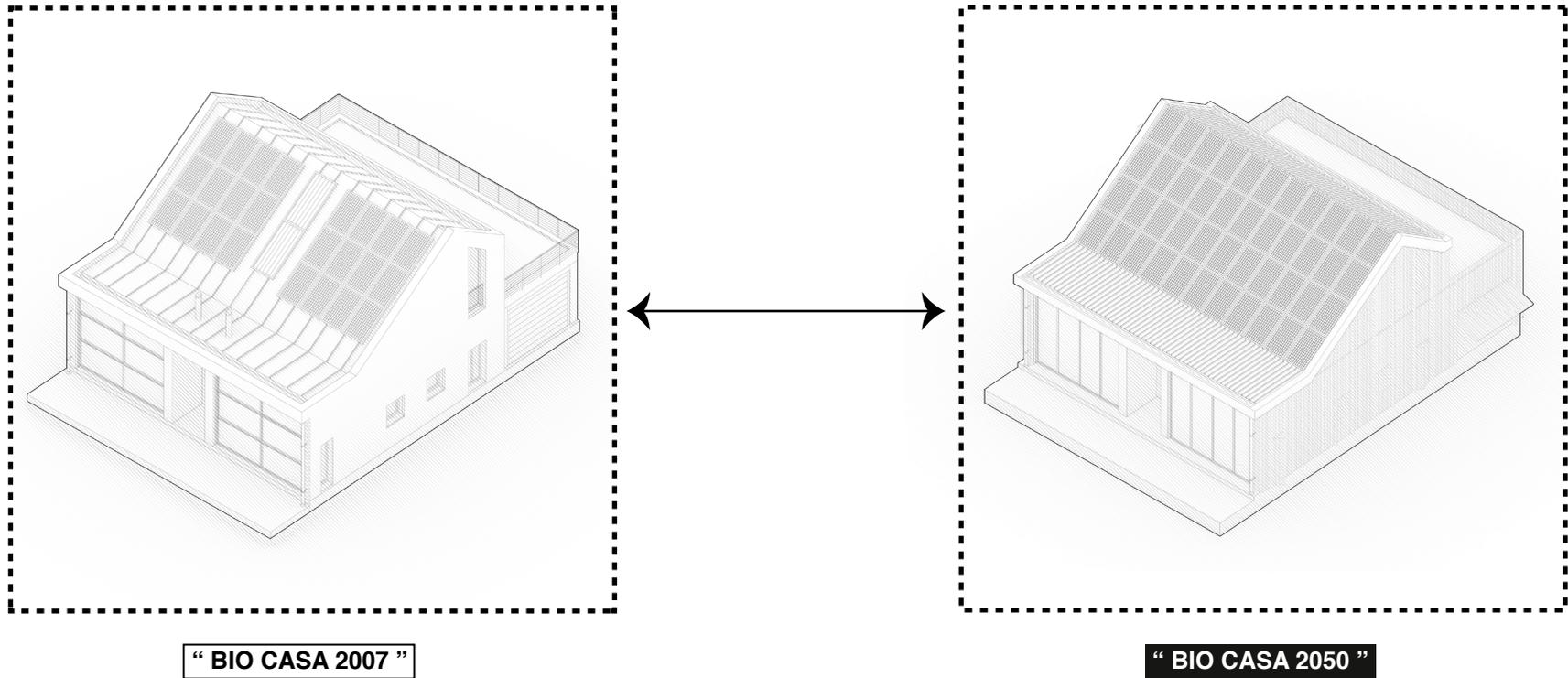


Fig. 107 Confronto grafico degli apporti di anidride carbonica contabilizzati per la rendicontazione della nuova WLC 2022



WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 1 791.4

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 9.006

WLC kgCO₂eq/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 -1 892.06

WLC (kgCO₂eq/m²)/anno
 WLC (scenario 2 70-30%) 2022 -9.513

Fig. 108 Confronto grafico degli apporti di anidride carbonica contabilizzati per la rendicontazione della nuova WLC per lo scenario 2022

In conclusione, come spesso ricordato, la Tesi opera su una tematica in mutamento o, per meglio dire, in **continuo aggiornamento** e revisione da parte della comunità scientifica internazionale.

Gli esiti del lavoro non sono quindi da intendersi come un risultato compiuto e conclusivo ma bensì come un'**opportunità** per riflettere su argomenti complessi, evidenziando potenzialità e criticità dei metodi di calcolo e proponendo soluzioni per affinare e implementare la metodologia di valutazione.

Per quanto concerne le prospettive future e i possibili sviluppi della metodologia WLC, si ritiene fondamentale sottolineare come un **primo** passo per l'introduzione della metodologia, sul territorio **nazionale**, può consistere nella delineazione di un *database opensource* italiano. Come riscontrato nel caso tedesco (ovvero il *database Ökobaudat*), l'implementazione di dati riguardanti il carbonio per l'intero ciclo di vita delle componenti edilizie permette un collazionamento di risultati WLC sul patrimonio costruito, facilitando in questo modo non solo l'individuazione **iniziale** di *benchmark*, ma, conseguentemente, l'introduzione di nuovi standard normativi (volontari prima, obbligatori poi) fondamentali per un allineamento nazionale con le politiche europee per la decarbonizzazione del settore edilizio.

In tal senso, l'introduzione di normative aggiornate dovrebbe contemplare l'applicazione di valori *threshold* di WLC **progressivi** nel tempo, come effettuato dal governo danese e francese, il cui operato è stato descritto nei paragrafi 4.1. e 4.2.. Infatti, un'adozione di valori

di soglia gradualmente nel tempo, permette di ottenere un beneficio fondamentale, ossia quello di non innescare una paralisi del settore concedendo, agli attori coinvolti, il tempo necessario per una comprensione profonda sia della metodologia di rendicontazione WLC sia delle sue possibili applicazioni.

Si ricorda, infatti, che ad oggi la metodologia WLC rappresenta sicuramente uno strumento **cardine** per la possibile riduzione delle emissioni di anidride carbonica equivalente dei manufatti edilizi, ma, al contempo, è fondamentale evidenziare come la sua futura applicazione comporterà delle considerevoli ed inevitabili modifiche all'interno del processo architettonico. Se prima il ruolo dell'architetto era principalmente connesso a tematiche estetiche o economiche di progetto, attualmente il suo operato è sempre più legato a tematiche di sostenibilità che, come nel caso della WLC, potrebbero risultare in un primo momento di **complessa** attuazione. Per questo motivo, risulta fondamentale la corretta divulgazione e introduzione della tematica all'interno del settore edilizio, al fine di incentivare ed efficientare l'adozione della metodologia da parte di progettisti e valutatori.

Al proposito, si riporta la considerazione effettuata dal BPIE all'interno del già citato documento *How to embed Whole Life Carbon in the EPDB* (BPIE 2022c). Come ricordato dall'Istituto, e più volte ribadito all'interno del Capitolo 3 di questo lavoro di Tesi, la Whole Life Carbon trova il suo fondamento **normativo** all'interno dell'ultima versione della direttiva europea EPDB (European Commission 2021), la quale nel corso degli anni si è sempre contraddistinta per la sua capacità di introdurre

una serie di strumenti politici in grado di attuare una semplificazione per la **divulgazione** di specifici dati scientifici all'interno del settore edilizio degli Stati membri (si pensi ad esempio ai certificati di prestazione energetica).

Tale semplificazione, come suggerito dall'Istituto Europeo, dovrebbe perciò **ripetersi** anche per l'introduzione (all'interno degli strumenti politici dei singoli Stati) del concetto di WLC, al fine di implementare e rafforzare il quantitativo di dati inerenti alla WLC dei manufatti edilizi e, di conseguenza, ottenere un parco immobiliare europeo completamente decarbonizzato entro il 2050 (andando ad esempio ad aggiornare o a **ripensare** le odierne tipologie di certificazioni o di attestati di prestazione energetica).

ALLEGATI DI ANALISI - VALUTAZIONE WLC BIOCASA SAROTTO 2007

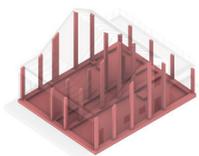


ALLEGATO 1 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLE FASI A1-A3

All'interno di questo primo allegato sono state raccolte e condivise tutte le informazioni necessarie per poter procedere con la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno delle fasi A1-A3.

Nello specifico, le informazioni dedotte sono afferenti a diverse tipologie come, ad esempio di:

- *di tipo geometrico (volume e superficie)*
- *di peso specifico (densità)*
- *di rifiuto prodotto (fpro)*
- *di impatto ambientale (ovvero di Embodied Carbon unitaria)*



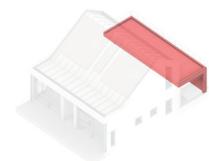
STRUTTURA DI FONDAZIONI

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	Fat. cor. fA1-A3	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	205.0	20.5	2 200.0	45 100.0	5%	2 255.0	47 355.0	259.3	1 m ³	5 315.7
<i>Struttura portante orizz. a platea in cls gettato in opera</i>	205.0	73.1	2 400.0	175 440.0	5%	8 772.0	184 212.0	259.3	1 m ³	18 954.8
<i>Struttura portante verticale pilastri in cls gettato in opera</i>	46.5	8.4	2 400.0	20 160.0	5%	1 008.0	21 168.0	259.3	1 m ³	2 178.1
										26 448.6



PARETE PERIMETRALE S32

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	Fat. cor. fA1-A3	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura esterno in intonaco di calce (2cm)</i>	192.5	2.3	1 400.0	3 234.0	5%	161.7	3 395.7	129.1	1 m ³	298.2
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso (10cm)</i>	192.5	6.2	20.0	124.0	9%	11.2	135.2	57.7	1 m ³	357.7
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (6cm)</i>	192.5	11.6	1 500.0	17 400.0	1%	174.0	17 574.0	19.5	1 m ²	3 753.8
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso (18cm)</i>	192.5	34.6	20.0	692.0	9%	62.3	754.3	57.7	1 m ³	1 996.4
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (8cm)</i>	192.5	11.2	1 200.0	13 440.0	1%	134.4	13 574.4	26.0	1 m ²	5 005.0
<i>Strato di rivestimento interno in cartongesso (1,2cm)</i>	192.5	2.3	760.0	1 748.0	22%	384.6	2 132.6	1.6	1 m ²	305.2
										11 716.3



PARETE PERIMETRALE S24

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	Fat. cor. fA1-A3	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura esterno in intonaco di calce (2cm)</i>	56.0	1.0	1 400.0	1 400.0	5%	70.0	1 470.0	129.1	1 m ³	129.1
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (7cm)</i>	56.0	3.0	1 500.0	4 500.0	1%	45.0	4 545.0	22.8	1 m ²	1 274.0
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso (8cm)</i>	56.0	4.1	20.0	82.0	9%	7.4	89.4	57.7	1 m ³	236.6
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (6cm)</i>	56.0	3.1	1 500.0	4 650.0	1%	46.5	4 696.5	19.5	1 m ²	1 092.0
<i>Strato di rivestimento interno in cartongesso (1cm)</i>	56.0	0.5	760.0	380.0	22%	83.6	463.6	1.6	1 m ²	84.6
										2 816.3

**PARETE INTERNA S9**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di rivestimento interno in cartongesso (1cm)	64.0	0.6	760.0	478.8	22%	105.3	584.1	1.6	1 m ²	101.1
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (9 cm)	65.0	5.1	1 500.0	7 575.0	1%	75.8	7 650.8	29.3	1 m ²	1 901.3
Strato di rivestimento interno in cartongesso (1cm)	64.0	0.6	760.0	478.8	22%	105.3	584.1	1.6	1 m ²	101.1
										2 103.4

**SOLAIO CONTROTERRA**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di rivestimento superiore in ceramica (2 cm)	131.0	3.1	1 820.0	5 642.0	9%	507.8	6 149.8	11.0	1 m ²	1 444.9
Strato di sostegno in cls alleggerito (10 cm)	131.0	15.4	1 100.0	16 984.0	5%	849.2	17 833.2	217.0	1 m ³	3 350.5
Strato isolante a base di polistirene espanso (3 cm)	131.0	4.6	30.0	138.9	9%	12.5	151.4	84.5	1 m ³	391.3
Strato isolante in cls alleggerito (7 cm)	131.0	11.0	300.0	3 300.0	9%	297.0	3 597.0	184.4	1 m ³	2 028.4
Strato di intercapedine (igloo) (25 cm)	131.0	672.0	1.3	873.6	1%	8.7	882.3	3.7	1 kg	3 291.1
										10 506.3

**SOLAIO INTERPIANO**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di rivestimento superiore in ceramica (2 cm)	46.9	0.5	1 820.0	855.4	9%	77.0	932.4	11.0	1 m ²	517.7
Strato di rivestimento sup. in blocchi di cls (4 cm)	42.2	1.7	2 200.0	3 696.0	2%	73.9	3 769.9	242.4	1 m ³	407.1
Strato di sostegno in cls alleggerito (5 cm)	89.2	4.5	1 100.0	4 895.0	5%	244.8	5 139.8	217.0	1 m ³	965.7
Strato isolante in cls alleggerito (7 cm)	89.2	6.3	300.0	1 875.0	9%	168.8	2 043.8	184.4	1 m ³	1 152.5
Strato portante in cls alleggerito (6 cm)	89.2	9.0	1 500.0	13 500.0	1%	135.0	13 635.0	19.5	1 m ²	1 738.6
Strato di supporto in lastre predalles (18 cm)	89.2	12.4	10.0	124.0	9%	11.2	135.2	45.4	1 m ³	563.0
Strato isolante a base di polistirene espanso (5 cm)	89.2	4.7	18.0	85.0	9%	7.6	92.6	57.7	1 m ³	272.3
Strato di finitura esterno in intonaco di calce (2cm)	89.2	0.5	1 400.0	658.0	5%	32.9	690.9	129.1	1 m ³	60.7
										5 677.6



SOLAIO COPERTURA

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di rivestimento superiore in alluminio (4cm)</i>	134.0	5.5	2.2	294.8	1%	2.9	297.7	23.1	1 m ²	3 096.7
<i>Strato di supporto in legno (10cm)</i>	134.0	0.7	450.0	292.5	9%	26.3	318.8	50.9	1 m ³	33.1
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	134.0	/	5.0	670.0	9%	60.3	730.3	2.6	1 m ²	353.8
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso (17cm)</i>	134.0	22.8	20.0	456.0	9%	41.0	497.0	57.7	1 m ³	1 315.6
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso (5 cm)</i>	134.0	4.7	18.0	85.0	9%	7.6	92.6	57.7	1 m ³	272.3
<i>Strato di supporto in lastre predalles (18 cm)</i>	134.0	18.9	10.0	189.0	9%	17.0	206.0	45.4	1 m ³	858.1
<i>Strato portante in cls alleggerito (6 cm)</i>	134.0	12.9	1 500.0	19 350.0	1%	193.5	19 543.5	19.5	1 m ²	2 613.0
<i>Strato di finitura interno in intonaco di calce (2cm)</i>	134.0	2.7	1 400.0	3 780.0	5%	189.0	3 969.0	129.1	1 m ³	348.6
										8 891.1



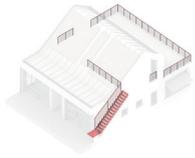
INFISSI ESTERNI

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	11.1	0.8	2 700.0	2 160.0	1%	21.6	2 181.6	249.2	1 m ²	2 762.4
<i>Schermatura in alluminio</i>	45.2	/	2.7	122.0	1%	1.2	123.3	11.0	1 m ²	494.9
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	45.2	/	20.0	904.0	1%	9.0	913.0	36.4	1 m ²	1 645.3
										4 902.6



PORTE

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Porta interna tamburata</i>	15.8	0.9	200.0	184.0	1%	1.8	185.8	37.7	1 m ²	597.2
<i>Porta di ingresso legno lamellare</i>	2.6	0.2	550.0	82.5	1%	0.8	83.3	37.7	1 m ²	96.9
<i>Porta garage in acciaio</i>	14.5	0.4	7 800.0	2 808.0	1%	28.1	2 836.1	27.7	1 m ²	402.1
										1 096.1

**CORPO SCALA**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Pedata in legno</i>	/	0.2	550.0	93.5	9%	8.4	101.9	50.9	1 m ³	8.6
<i>Strato portante in acciaio</i>	/	0.0	7 800.0	312.0	1%	3.1	315.1	1.0	1 kg	315.1
<i>Elemento di protezione parapetto in acciaio</i>	5.1	31.0	22.5	697.5	1%	7.0	704.5	2.5	1 kg	1 779.5
										2 103.3

**IMPIANTO SMALTIMENTO LIQUIDI**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Elemento di scarico acque meteoriche in alluminio (grondaia)</i>	14.6	/	2.3	33.6	1%	0.3	33.9	1.9	1 kg	65.3
										65.3

ALLEGATO 2 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE A4

All'interno di questo secondo allegato sono stati raccolte e condivise tutte le informazioni ricercate e collezionate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno della fase di Trasporto al cantiere, ovvero la fase del ciclo di vita A4.

Nello specifico, le informazioni dedotte per il calcolo di questa fase sono state di:

- peso (chilogrammi di prodotto di Bill of quantities)*
- di tipologia di mezzo impiegato (ovvero tipologia di autocarro contemplato)*
- di numero di viaggio necessari*
- di caratteristiche specifiche del viaggio (riportando parametri come, ad esempio, di consumo specifico E o di consumo del mezzo F)*

	N	Autocarro	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vettore en.	EC A4
	t	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	47.4	24-40 t	22.7	14.4	26.0	2.0	135.1	50.0	67.6	3.2	218.9
<i>Struttura portante orizzontale in cls</i>	184.2	24-40 t	22.7	14.4	26.0	7.0	1 840.0	50.0	920.0	3.2	2 980.8
<i>Struttura portante verticale in cls</i>	21.2	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	30.2	50.0	15.1	3.2	48.9
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (controter.)</i>	17.8	24-40 t	22.7	14.4	26.0	3.0	76.3	50.0	38.2	3.2	123.7
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (interp.)</i>	5.1	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	10.1	50.0	5.0	3.2	16.3
<i>Rivestimento sup. in blocchi cls (interp.)</i>	3.8	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.4	50.0	3.7	3.2	12.0
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	17.6	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	25.1	50.0	12.5	3.2	40.6
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	4.7	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	9.2	50.0	4.6	3.2	14.9
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (interp.)</i>	12.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	23.6	50.0	11.8	3.2	38.2
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (interp.)</i>	1.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.6	50.0	3.3	3.2	10.7
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (copert.)</i>	19.5	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	27.9	50.0	13.9	3.2	45.2
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	4.5	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	8.9	50.0	4.5	3.2	14.4
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	12.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	23.4	50.0	11.7	3.2	38.0
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	1.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.6	50.0	3.3	3.2	10.7
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S9)</i>	7.7	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	15.0	50.0	7.5	3.2	24.3
<i>Strato iso. in cls alleg. (controter.)</i>	3.6	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.0	50.0	3.5	3.2	11.4
<i>Strato iso. in cls alleg. (interp.)</i>	2.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	8.4	50.0	4.2	3.2	13.6
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.6	50.0	1.8	3.2	5.9
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S32)</i>	2.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	8.8	50.0	4.4	3.2	14.2
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S9)</i>	1.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	4.8	50.0	2.4	3.2	7.8
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S24)</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.9	50.0	1.0	3.2	3.1
<i>Strato di finitura in inton. di calce (S32)</i>	3.4	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	6.6	50.0	3.3	3.2	10.8
<i>Strato di finitura in inton. di calce (S24)</i>	1.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.0	50.0	3.0	3.2	9.8
<i>Strato di finitura in inton. di calce (interp.)</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.8	50.0	1.4	3.2	4.6
<i>Strato di finitura in inton. di calce (copert.)</i>	4.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.8	50.0	3.9	3.2	12.6
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (controter.)</i>	6.1	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	12.0	300.0	36.1	3.2	117.1
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (interp.)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.8	300.0	11.5	3.2	37.3
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (S32)</i>	0.8	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.1	50.0	1.6	3.2	5.0
<i>Strato iso. a base di polist. esp.(S24)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.4	50.0	0.2	3.2	0.6
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (controter.)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	300.0	1.9	3.2	6.1
<i>Strato iso. a base di polist. esp.(interp.)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.4	50.0	0.2	3.2	0.6
<i>Strato di sup. in lastre predalles (interp.)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	50.0	0.3	3.2	0.9
<i>Strato di sup. in lastre predalles(coper.)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.8	50.0	0.4	3.2	1.4

<i>Strato iso. a base di polist. esp. (S32)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	300.0	1.7	3.2	5.4
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (copert.)</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.0	300.0	6.1	3.2	19.9
<i>Strato di tenuta al vapore (copert.)</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.0	50.0	1.5	3.2	4.9
<i>Serr. ed elemento soglia in alluminio</i>	3.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	13.2	50.0	6.6	3.2	21.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.1	50.0	0.1	3.2	0.2
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.2	50.0	0.6	3.2	2.0
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.5	50.0	0.3	3.2	0.8
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.8	50.0	1.9	3.2	6.1
<i>Porte interne in legno</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.1	50.0	0.6	3.2	1.8
<i>Strato di sup. in legno</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.3	50.0	0.7	3.2	2.1
<i>Corpo scala</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.7	300.0	5.1	3.2	16.7
<i>Porta garage in acciaio</i>	2.8	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	11.7	300.0	35.0	3.2	113.4
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.9	50.0	1.4	3.2	4.7

4 099.6

ALLEGATO 3 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE A5

In questo terzo allegato, si procede con la presentazione degli steps necessari per una rendicontazione, il più possibile completa, della fase A5 ovvero della fase del ciclo di vita riguardante la Costruzione del manufatto.

Nel dettaglio, a differenza dei due precedenti allegati, in questo non sarà presentata una sola tabella riassuntiva, bensì saranno mostrati in due diversi elaborati i risultati ottenuti, in termini di emissioni, riguardanti prima al sollevamento degli elementi prefabbricati e in seguito quelli concerni alla miscelazione degli elementi gettati in opera.

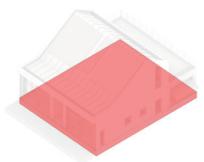
RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio di copertura</i>	0.25	134.00	33.50	1 954.90	0.26	28.00	7.22	1 962.13



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio interpiano</i>	0.04	89.16	3.57	208.12	0.03	28.00	0.77	208.89



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio controterra</i>	0.04	131.00	5.24	305.78	0.04	28.00	1.13	306.91

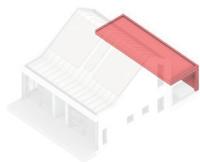


Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Corposcala</i>	1.00	5.00	5.00	291.78	0.04	28.00	1.08	292.85

RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete perimetrale (tipo S32)</i>	0.13	192.45	25.66	1 497.40	0.20	28.00	5.53	1 502.93



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete perimetrale (tipo S24)</i>	0.13	56.00	7.47	435.72	0.20	28.00	1.61	437.33



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete interna (tipo S9)</i>	0.13	63.79	8.51	496.33	0.07	28.00	1.83	498.17

RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	0.10	20.50	2.05	6.74	0.00	28.00	0.03	6.77



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante orizzontale</i>	0.10	73.10	7.31	24.03	0.00	28.00	0.10	24.13



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante verticale</i>	0.10	8.40	0.84	2.76	0.00	28.00	0.01	2.77



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Strato di fin. in intonaco di calce</i>	0.10	3.31	0.33	1.09	0.00	28.00	0.00	1.09

ALLEGATO 4 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE B4

In questo Allegato 4, sono stati riassunti e collezionati tutti i procedimenti presi in considerazione per la deduzione dell'Embodied Carbon nella fase del ciclo di vita B4.

Al fine di una esposizione che possa risultare il più chiara ed esplicita possibile, si presentano in maniera suddivisa e puntuale tutti i valori riscontrati di EC degli elementi edilizi che nel corso dello scenario temporale di riferimento (il quale si ricorda essere pari a 50 anni) vedranno una loro sostituzione e re-installazione.

- Come primo elaborato tabellare, si mostra di seguito l'ammontare dei chilogrammi totali calcolati per la fase di Sostituzione (B4)

Elementi edilizi	CW kg	RF _{B4-j} cor n.	RW kg
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	226.8	4.0	907.2
<i>Infisso- intelaiatura in alluminio</i>	21.6	1.0	21.6
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.3	2.0	0.7
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	1.2	1.0	1.2
<i>Infisso- pannellatura in vetro</i>	9.0	1.0	9.0
<i>Porte interne in legno</i>	2.7	2.0	5.3
<i>Porta garage in acciaio</i>	28.1	1.0	28.1
<i>Parapetto in acciaio</i>	7.0	2.0	14.0

- A seguire, si è proceduti con il conteggio dell'Embodied Carbon appartenente ai materiali oggetto di sostituzione (calcolo effettuato attraverso impiego del database Ökobaudat)

Elementi edilizi	EC A1-A3 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	418.3
<i>Infisso- intelaiatura in alluminio</i>	2 762.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	65.3
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	494.9
<i>Infisso- pannellatura in vetro</i>	1 645.3
<i>Porte interne in legno</i>	694.1
<i>Porta garage in acciaio</i>	402.1
<i>Parapetto in acciaio</i>	1 779.5

- Si continua con la rendicontazione dell'Embodied Carbon afferente alla fase A4, per i soli chilogrammi di prodotto sostituito

Elementi edilizi	EC A4 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	18.9
<i>Infisso- intelaiatura in alluminio</i>	21.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.2
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.8
<i>Infisso- pannellatura in vetro</i>	6.1
<i>Porte interne in legno</i>	1.8
<i>Porta garage in acciaio</i>	113.4
<i>Parapetto in acciaio</i>	4.7

- Per quanto concerne invece la fase del ciclo di vita A5, si ritiene opportuno rendicontare soltanto il contributo di Embodied Carbon dato dallo strato superficiale in intonaco. Di fatti gli altri contributi, come ad esempio quelli dovuti all'installazione di un nuovo serramento, si ritengono assolutamente trascurabili o nulli.

Elementi edilizi	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	0.5

- Nel quinto elaborato tabellare a pagina seguente, invece, si riportano i valori desunti all'interno delle fasi del ciclo di vita C2-C4. Come si può dedurre dalle tabelle sottostanti, all'interno di questa fase sono stati riportati due diversi scenari di demolizione, al fine di contabilizzare anche in questa fase i contributi, in termini di Embodied Carbon, dati dai due diversi scenari di smaltimento rifiuti contemplati (i quali si ricordano essere gli scenari 100% e 70-30%).

Elementi edilizi	EC C2-C4 RW S1
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1.74
<i>Infisso- intelaiatura in alluminio</i>	0.17
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.00
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.01
<i>Infisso- pannellatura in vetro</i>	0.07
<i>Porte interne in legno</i>	5.75
<i>Porta garage in acciaio</i>	0.22
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.05

Elementi edilizi	EC C2-C4 RW S2
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1.74
<i>Infisso- intelaiatura in alluminio</i>	0.17
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.00
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.01
<i>Infisso- pannellatura in vetro</i>	0.20
<i>Porte interne in legno</i>	-1.29
<i>Porta garage in acciaio</i>	0.21
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.05

- In conclusione, si riportano i risultati ottenuti per la fase B4 attraverso la messa in pratica della formula [12], spiegata all'interno del paragrafo 6.4.3.

Elementi edilizi	EC B4 S1
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1 757.8
<i>Infissi esterni</i>	4 931.2
<i>Grondaia in alluminio</i>	131.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	3 568.5
<i>Porte interne in legno</i>	1 403.2
<i>Porta garage in acciaio</i>	515.7

12 307.4

Elementi edilizi	EC B4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	1 575.8
<i>Infissi esterni</i>	4 931.3
<i>Grondaia in alluminio</i>	131.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	3 568.5
<i>Porte interne in legno</i>	1 389.1
<i>Porta garage in acciaio</i>	5157
	12 293.4

ALLEGATO 5 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE C1

All'interno di questo quinto allegato si riportano i risultati ottenuti per la fase di Demolizione C1.

In tale fase le emissioni di anidride carbonica sono state suddivise e ricondotte a due differenti tipologie di rifiuto e quindi a due differenti tipologie di Demolizione, nel dettaglio sono stati contabilizzati:

- i chilogrammi di rifiuti provenienti da Demolizione in fase d'Uso (DU)*
- i chilogrammi di rifiuti prodotti da Demolizione end-of life (DeoL)*

Infine, si ricorda che i due contributi (i quali concorreranno all'ammontare finale della fase C1) sono stati dedotti tramite impiego sempre del database Ökobaudat.

	C1	Ref. Flo	Quant. Corrispondente	RFB4-j cor.	ECC1DU	ECC1DEOL
	kgCO ₂ eq	m ³ /m ² /kg	m ³ /m ² /kg	n.	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	0.7	1 m ³	20.5	0.0	0.0	13.7
<i>Struttura portante orizzontale in cls</i>	0.6	1 m ³	73.1	0.0	0.0	44.6
<i>Struttura portante verticale in cls</i>	0.6	1 m ³	8.4	0.0	0.0	5.1
<i>Strato di sostegno in cls alleg, (controter.)</i>	0.1	1 m ³	15.4	0.0	0.0	1.7
<i>Strato di sostegno in cls alleg, (interp.)</i>	0.1	1 m ³	4.5	0.0	0.0	0.5
<i>Rivestimento sup. in blocchi cls (interp.)</i>	1.3	1 m ³	1.7	0.0	0.0	2.2
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	0.2	1 m ²	192.5	0.0	0.0	30.2
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	0.1	1 m ²	56.0	0.0	0.0	7.7
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (interp.)</i>	0.1	1 m ²	89.2	0.0	0.0	9.3
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (copert.)</i>	0.1	1 m ²	134.0	0.0	0.0	14.0
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	0.1	1 m ²	56.0	0.0	0.0	6.8
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	0.1	1 m ²	192.5	0.0	0.0	26.6
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S9)</i>	0.2	1 m ²	65.0	0.0	0.0	10.2
<i>Strato iso. in cls alleg. (controter.)</i>	0.1	1 m ³	131.0	0.0	0.0	14.4
<i>Strato iso. in cls alleg. (interp.)</i>	0.1	1 m ³	89.2	0.0	0.0	9.8
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	0.0	1 kg	873.6	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S32)</i>	0.1	1 m ²	193.2	0.0	0.0	15.5
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S9)</i>	0.1	1 m ²	64.0	0.0	0.0	5.1
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S24)</i>	0.1	1 m ²	53.6	0.0	0.0	4.3
<i>Strato di finitura in intonaco di calce (S32)</i>	0.0	1 m ²	116.8	4.0	14.0	3.5
<i>Strato di finitura in intonaco di calce (S24)</i>	0.0	1 m ²	53.6	4.0	6.4	1.6
<i>Strato di finitura in inton. di calce (interp.)</i>	0.0	1 m ²	89.2	4.0	10.7	2.7
<i>Strato di finitura in intonaco di calce (copert.)</i>	0.0	1 m ²	134.0	4.0	16.1	4.0
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (controter.)</i>	0.0	1 m ²	131.0	0.0	0.0	2.2
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (interp.)</i>	0.0	1 m ²	46.9	0.0	0.0	0.8
<i>Strato iso. a base di polistirene esp. (S32)</i>	0.0	1 m ³	34.6	0.0	0.0	0.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.(S24)</i>	0.0	1 m ³	4.1	0.0	0.0	0.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp. (controter.)</i>	0.0	1 m ³	4.6	0.0	0.0	0.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.(interp.)</i>	0.0	1 m ³	4.7	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di sup. in lastre predalles (interp.)</i>	0.0	1 m ³	12.4	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di sup. in lastre predalles(coper.)</i>	0.0	1 m ³	18.9	0.0	0.0	0.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp. (S32)</i>	0.0	1 m ³	6.2	0.0	0.0	0.0
<i>Strato iso. a base di polistirene esp. (copert.)</i>	0.0	1 m ³	22.8	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di tenuta al vapore (copert.)</i>	0.0	1 m ²	134.0	0.0	0.0	0.0
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	0.0	1 m ²	11.1	1.0	0.0	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	1 kg	33.6	4.0	0.0	0.0

<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.0	1 m ²	134.0	0.0	0.0	2.7
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.0	1 m ²	45.2	1.0	0.6	0.6
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.0	1 m ²	45.2	1.0	0.0	0.0
<i>Porte interne in legno</i>	0.0	1 m ²	18.4	2.0	0.0	0.0
<i>Strato di sup. in legno</i>	0.0	1 m ²	134.0	0.0	0.0	0.0
<i>Corpo scala</i>	0.0	1 kg	312.0	0.0	0.0	0.2
<i>Porta garage in acciaio</i>	0.0	1 m ²	14.5	1.0	0.0	0.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.0	1 kg	697.5	2.0	0.0	0.0
					47.8	240.1

ALLEGATO 6 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE C2

All'interno di questo sesto allegato sono state raccolte e condivise tutte le informazioni ricercate e collezionate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno della fase di Trasporto al sito di smaltimento, C2.

Nello specifico, le informazioni dedotte per il calcolo di questa fase sono state di:

- *peso (chilogrammi di prodotto di Design as built)*
- *di tipologia di mezzo impiegato (ovvero tipologia di autocarro contemplato)*
- *di numero di viaggio necessari*
- *di caratteristiche specifiche del viaggio (riportando parametri come, ad esempio, di consumo specifico E o di consumo del mezzo F)*

	N	Autocarro	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vettore en.	EC C2
	N	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	45.1	24-40 t	22.7	14.4	26.0	2.0	128.7	50.0	64.4	3.2	208.5
<i>Struttura portante orizzontale in cls</i>	175.4	24-40 t	22.7	14.4	26.0	7.0	1 752.4	50.0	876.2	3.2	2 838.8
<i>Struttura portante verticale in cls</i>	20.2	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	28.8	50.0	14.4	3.2	46.6
<i>Strato di sostegno in cls alleg, (controter.)</i>	17.0	24-40 t	22.7	14.4	26.0	3.0	72.7	50.0	36.4	3.2	117.8
<i>Strato di sostegno in cls alleg, (interp.)</i>	4.9	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	9.6	50.0	4.8	3.2	15.5
<i>Rivestimento sup. in blocchi cls (interp.)</i>	3.7	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.2	50.0	3.6	3.2	11.7
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	17.4	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	24.8	50.0	12.4	3.2	40.2
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	4.7	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	9.1	50.0	4.6	3.2	14.8
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (interp.)</i>	13.5	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	19.3	50.0	9.6	3.2	31.2
<i>Strato port. soletta in cls prefab. (copert.)</i>	19.4	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	27.6	50.0	13.8	3.2	44.7
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S24)</i>	4.5	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	8.8	50.0	4.4	3.2	14.3
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S32)</i>	13.4	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	19.2	50.0	9.6	3.2	31.1
<i>Strato port. lastra in cls prefab. (S9)</i>	7.6	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	14.8	50.0	7.4	3.2	24.0
<i>Strato iso. in cls alleg. (controter.)</i>	3.3	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	6.5	50.0	3.2	3.2	10.5
<i>Strato iso. in cls alleg. (interp.)</i>	1.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	7.7	50.0	3.9	3.2	12.5
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.6	50.0	1.8	3.2	5.8
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S32)</i>	1.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	7.2	50.0	3.6	3.2	11.7
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S9)</i>	1.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.9	50.0	2.0	3.2	6.4
<i>Strato di riv. interno in cartongesso (S24)</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.6	50.0	0.8	3.2	2.5
<i>Strato di finitura in inton. di calce (S32)</i>	3.2	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	6.3	50.0	3.2	3.2	10.3
<i>Strato di finitura in inton. di calce (S24)</i>	1.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	5.8	50.0	2.9	3.2	9.3
<i>Strato di finitura in inton. di calce (interp.)</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.7	50.0	1.4	3.2	4.4
<i>Strato di finitura in inton. di calce (copert.)</i>	3.8	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.4	50.0	3.7	3.2	12.0
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (controter.)</i>	5.6	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	11.0	50.0	5.5	3.2	17.9
<i>Strato di riv.sup. in ceramica (interp.)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.5	50.0	1.8	3.2	5.7
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (S32)</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.8	50.0	1.4	3.2	4.6
<i>Strato iso. a base di polist. esp.(S24)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.3	50.0	0.2	3.2	0.5
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (controter.)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	50.0	0.3	3.2	0.9
<i>Strato iso. a base di polist. esp.(interp.)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.3	50.0	0.2	3.2	0.6
<i>Strato di sup. in lastre predalles (interp.)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.5	50.0	0.3	3.2	0.8
<i>Strato di sup. in lastre predalles(coper.)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.8	50.0	0.4	3.2	1.3
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (S32)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.5	50.0	0.3	3.2	0.8
<i>Strato iso. a base di polist. esp. (copert.)</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.9	50.0	0.9	3.2	3.0
<i>Strato di tenuta al vapore (copert.)</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.8	50.0	1.4	3.2	4.5
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	3.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	13.1	50.0	6.6	3.2	21.2
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.1	50.0	0.1	3.2	0.2
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.2	50.0	0.6	3.2	2.0

<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.5	50.0	0.3	3.2	0.8
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	1.9	3.2	6.0
<i>Porte interne in legno</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.1	50.0	0.5	3.2	1.8
<i>Strato di sup. in legno</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.2	50.0	0.6	3.2	1.9
<i>Corpo scala</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.7	50.0	0.8	3.2	2.7
<i>Porta garage in acciaio</i>	2.8	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	11.6	50.0	5.8	3.2	18.7
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.9	50.0	1.4	3.2	4.6

3 625.3

ALLEGATO 7 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON E DELLA CARBON UPTAKE NELLE FASI C3-C4

All'interno di questo settimo allegato, si riporta la fase più complessa della metodologia.

Al fine, di mostrare nella maniera più chiara possibile le procedure e i quantitativi contabilizzati (in termini sia di peso che di impatto) si mostreranno i risultati in maniera meno riassuntiva rispetto agli scorsi allegati.

Nel dettaglio, saranno presentati in primis i risultati ottenuti di Embodied Carbon per lo scenario 100% a discarica e solo in seguito saranno condivisi i risultati ottenuti per lo scenario 70-30%.

In un secondo momento invece saranno mostrati e presi in esame i procedimenti seguiti per la contabilizzazione della Carbon Uptake della fase C3-C4.

- Come primo elaborato tabellare si mostra il conteggio effettuato per la deduzione dei chilogrammi di rifiuti appartenenti alle diverse tipologie di Demolizione contemplate (nel dettaglio, si riportano i chilogrammi di "Demolition Waste", "Construction Waste", "Replacement Waste")

	DW kg	CW kg	RW kg
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	240 700.00	12 035.00	
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato</i>	3 696.00	73.92	
<i>Strato portante o di sostegno in cls prefabb.</i>	102 294.00	1 898.10	
<i>Strato isolante in cls alleggerito</i>	5 175.00	465.75	
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	873.60	8.74	
<i>Strato di riv. interno in cartongesso</i>	3 085.60	678.83	
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	9 072.00	453.60	907.20
<i>Strato di riv.sup. in ceramica</i>	6 497.40	584.77	
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.</i>	1 890.86	170.18	
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	670.00	60.30	
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	2 160.00	21.60	21.60
<i>Grondaia in alluminio</i>	33.58	0.34	0.67
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	294.80	2.95	
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	122.04	1.22	1.22
<i>Pannellatura in vetro</i>	904.00	9.04	9.04
<i>Porte interne in legno</i>	266.50	2.67	5.33
<i>Strato di sup. in legno</i>	386.00	34.74	
<i>Corpo scala in acciaio</i>	312.00	3.12	
<i>Porta garage in acciaio</i>	2 808.00	28.08	28.08
<i>Parapetto in acciaio</i>	697.50	6.98	13.95
	381 938.9	16 539.6	987.1

- Di seguito invece si mostra uno stralcio tabellare riguardante i valori di emissione desunti dal foglio di calcolo BEIS, per la deduzione del quantitativo di Embodied Carbon dovuto allo smaltimento di determinati materiali. Nel dettaglio, i suddetti valori si riportano dividendoli secondo i più comuni scenari di smaltimento.

	Riuso kgCO ₂ eq	Open-loop kgCO ₂ eq	Closed-loop kgCO ₂ eq	Combustione kgCO ₂ eq	Compostaggio kgCO ₂ eq	Discarica kgCO ₂ eq
<i>Calcestruzzo</i>		0.001	0.001			0.001
<i>Isolanti</i>			0.001			0.001
<i>Mattoni</i>		0.001				0.001
<i>Metallo generico</i>			0.001			0.001
<i>Cartongesso</i>			0.021	0.021		0.072
<i>Legno</i>	-1.650	-1.620	-1.620	1.650	1.650	2.150
<i>Vetro</i>		0.021	0.021	0.021		0.001
<i>Elettronica (batterie di accumulo)</i>		0.021				0.009
<i>Plastica generica</i>		0.021	0.021	0.021		0.009
<i>Materiale medio da costruzione</i>		0.001	0.001	0.021		

• In questo terzo elaborato si riportano i risultati riscontrati, in termini di chilogrammi di anidride carbonica equivalente, per gli elementi edilizi all'interno dello Scenario di smaltimento S1 (100%).

N.B. In rosso sono evidenziate le voci che non concorrono alla contabilizzazione della EC_{C3-C4} bensì della CS_{C3-C4}

	DW S1 kgCO ₂ eq	CW S1 kgCO ₂ eq	RW S1 kgCO ₂ eq
Struttura portante in cls gettato in opera	240.70	12.04	
Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato	3.70	0.07	
Strato portante o di sostegno in cls prefabb.	102.29	1.90	
Strato isolante in cls alleggerito	5.18	0.47	
Strato di intercapedine (igloo)	7.76	0.08	
Strato di riv. interno in cartongesso	222.16	48.88	
Strato di finitura in intonaco di calce	9.07	0.45	0.91
Strato di riv.sup. in ceramica	6.50	0.58	
Strato iso. a base di polistirene esp.	1.89	0.17	
Strato di tenuta al vapore	0.67	0.06	
Serramento ed elemento soglia in alluminio	2.16	0.02	0.02
Grondaia in alluminio	0.03	0.00	0.00
Strato di riv. sup. in alluminio	0.29	0.00	
Schermatura solare in alluminio	0.12	0.00	0.00
Pannellatura in vetro	0.90	0.01	0.01
Porte interne in legno	572.98	5.73	11.46
Strato di sup. in legno	829.90	74.69	
Corpo scala in acciaio	0.31	0.00	
Porta garage in acciaio	2.81	0.03	0.03
Parapetto in acciaio	0.70	0.01	0.01
	607.3	64.8	1.0
	1 402.9	80.4	11.5

- Nella tabella sottostante invece, si riportano i risultati per quel che concerne lo Scenario 70-30% (genericamente, come visto, definito S2).

Data la volontà di discretizzare il più possibile tale scenario, si prosegue con tre differenti tabelle, le quali mostrano la percentuale di rifiuto posto a processi di riciclo o riuso e quella invece posta a discarica, per tutte e tre le tipologie di rifiuto individuate (DW, CW, RW).

	Perc. ad altro scen.	S2	EC DW S2	Perc. a disc.	S1	EC DW S1
	%	kg	kgCO ₂ eq	%	kg	kgCO ₂ eq
Struttura portante in cls gettato in opera	70%	168 490.0	166.0	30%	72 210.0	72.2
Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato	80%	2 956.8	2.9	20%	739.2	0.7
Strato portante o di sostegno in cls prefabb.	70%	71 605.8	70.5	30%	30 688.2	30.7
Strato isolante in cls alleggerito	70%	3 622.5	3.6	30%	1 552.5	1.6
Strato di intercapedine (igloo)	70%	611.5	13.0	30%	262.1	2.3
Strato di riv. interno in cartongesso	70%	2 159.9	46.0	30%	925.7	66.6
Strato di finitura in intonaco di calce	70%	6 350.4	6.3	30%	2 721.6	2.7
Strato di riv.sup. in ceramica	70%	4 548.2	4.5	30%	1 949.2	1.9
Strato iso. a base di polistirene esp.	70%	1 323.6	1.3	30%	567.3	0.6
Strato di tenuta al vapore	70%	469.0	0.5	30%	201.0	0.2
Serramento ed elemento soglia in alluminio	90%	1 944.0	1.9	10%	216.0	0.2
Grondaia in alluminio	90%	30.2	0.0	10%	3.4	0.0
Strato di riv. sup. in alluminio	90%	265.3	0.3	10%	29.5	0.0
Schermatura solare in alluminio	90%	109.8	0.1	10%	12.2	0.0
Pannellatura in vetro	70%	632.8	13.5	30%	271.2	0.3
Porte interne in legno	70%	186.6	-302.2	30%	80.0	171.9
Strato di sup. in legno	70%	270.2	-445.8	30%	115.8	249.0
Corpo scala in acciaio	90%	280.8	0.3	10%	31.2	0.0
Porta garage in acciaio	90%	2 527.2	2.5	10%	280.8	0.3
Parapetto in acciaio	90%	627.8	0.6	10%	69.8	0.1
			333.6			180.5
			-748.0			420.9

	Perc. ad altro scen. %	S2 kg	EC CW S2 kgCO ₂ eq	Perc. a disc. %	S1 kg	EC CW S1 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	70%	8 424.5	8.3	30%	3 610.5	3.6
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato</i>	80%	59.1	0.1	20%	14.8	0.0
<i>Strato portante o di sostegno in cls prefabb.</i>	70%	1 328.7	1.3	30%	569.4	0.6
<i>Strato isolante in cls alleggerito</i>	70%	326.0	0.3	30%	139.7	0.1
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	70%	6.1	0.1	30%	2.6	0.0
<i>Strato di riv. interno in cartongesso</i>	70%	475.2	10.1	30%	203.6	14.7
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	70%	317.5	0.3	30%	136.1	0.1
<i>Strato di riv.sup. in ceramica</i>	70%	409.3	0.4	30%	175.4	0.2
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.</i>	70%	119.1	0.1	30%	51.1	0.1
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	70%	42.2	0.0	30%	18.1	0.0
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	90%	19.4	0.0	10%	2.2	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	90%	0.3	0.0	10%	0.0	0.0
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	90%	2.7	0.0	10%	0.3	0.0
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	90%	1.1	0.0	10%	0.1	0.0
<i>Pannellatura in vetro</i>	70%	6.3	0.1	30%	2.7	0.0
<i>Porte interne in legno</i>	70%	1.9	-3.0	30%	0.8	1.7
<i>Strato di sup. in legno</i>	70%	24.3	-40.1	30%	10.4	22.4
<i>Corpo scala in acciaio</i>	90%	2.8	0.0	10%	0.3	0.0
<i>Porta garage in acciaio</i>	90%	25.3	0.0	10%	2.8	0.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	90%	6.3	0.0	10%	0.7	0.0
			21.3			19.4
			-43.1			24.1

	Perc.ad altro scen.	S2	EC CW S2	Perc. a disc.	S1	EC CW S1
	%	kg	kgCO ₂ eq	%	kg	kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	70%	158.8	0.2	30%	68.0	0.1
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	70%	15.1	0.0	30%	6.5	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	70%	0.2	0.0	30%	0.2	0.0
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	70%	0.9	0.0	30%	0.4	0.0
<i>Pannellatura in vetro</i>	70%	6.3	0.1	30%	2.7	0.0
<i>Porte interne in legno</i>	70%	1.9	-3.0	30%	0.8	1.7
<i>Porta garage in acciaio</i>	70%	19.7	0.0	30%	8.4	0.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	70%	4.9	0.0	30%	2.1	0.0

	EC CW t.	RFB4-j cor.	EC RW
	kgCO ₂ eq	n.	kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	0.2	4.0	0.9
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	0.0	1.0	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	2.0	0.0
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.0	1.0	0.0
<i>Pannellatura in vetro</i>	0.1	1.0	0.1
<i>Porte interne in legno</i>	-1.3	2.0	-2.6
<i>Porta garage in acciaio</i>	0.0	1.0	0.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.0	2.0	0.0

1.1

-2.6

- In questo settimo elaborato si riportano i risultati riassunti e riscontrati all'interno dello Scenario di smaltimento S2 (70-30%).

Elementi edilizi	DW S2 kgCO ₂ eq	CW S2 kgCO ₂ eq	RW S2 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	238.2	11.9	
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefabbricato</i>	3.7	0.1	
<i>Strato portante o di sostegno in cls prefabb.</i>	101.2	1.9	
<i>Strato isolante in cls alleggerito</i>	5.1	0.5	
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	15.3	0.1	
<i>Strato di riv. interno in cartongesso</i>	112.6	24.8	
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	9.0	0.4	0.9
<i>Strato di riv.sup. in ceramica</i>	6.4	0.6	
<i>Strato iso. a base di polistirene esp.</i>	1.9	0.2	
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.7	0.1	
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	2.1	0.0	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di riv. sup. in alluminio</i>	0.3	0.0	
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	0.1	0.0	0.0
<i>Pannellatura in vetro</i>	13.7	0.1	0.1
<i>Porte interne in legno</i>	-130.3	-1.3	-2.6
<i>Strato di sup. in legno</i>	-196.9	-17.7	
<i>Corpo scala in acciaio</i>	0.3	0.0	
<i>Porta garage in acciaio</i>	2.8	0.0	0.0
<i>Parapetto in acciaio</i>	0.7	0.0	0.0
	514.1	40.7	1.1
	-327.2	-19.0	-2.6

- A seguire si riporta la metodologia adottata per desumere il quantitativo di **Carbon Uptake** degli elementi cementizi il cui ammontare, si ricorda, viene contabilizzato all'interno della fase C3-C4 per poi essere decurtato ai quantitativi di EC_{C3-C4} mostrati in precedenza.

Come primo elaborato tabellare, si mostra la procedura impiegata per il conteggio dei cubi (da lato 30 x 30 mm) prodotti dalle operazioni di demolizione per ogni elemento tecnico cementizio riscontrato.

Calcestruzzo gettato in opera	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	205.0	20.5	15.6	577 037.0
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	205.0	73.1	55.6	2 057 629.6
<i>Struttura portante verticale in cls gettato in opera</i>	46.5	8.4	6.4	236 444.4
Pareti in Calcestruzzo prefabbricato	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (8cm)</i>	192.5	11.2	8.5	315 259.3
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (6cm)</i>	192.5	11.6	8.8	326 518.5
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S9) (9cm)</i>	65.0	5.1	3.8	142 148.1
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (7cm)</i>	56.0	3.0	2.3	84 444.4
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (6cm)</i>	56.0	3.1	2.4	87 259.3
Pavimentazioni in Blocchi in calcestruzzo	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefab. (interp.) (4 cm)</i>	42.2	1.7	1.3	47 288.9
Policem	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato isolante in cls alleggerito (controt.) (6 cm)</i>	/	11.0	8.4	309 629.6
<i>Strato isolante in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	89.2	6.3	4.8	175 925.9
Solette in Calcestruzzo prefabbricato	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (interp.) (6 cm)</i>	89.2	9.0	6.8	253 333.3
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (copert.) (6 cm)</i>	134.0	12.9	9.8	363 111.1
Massetto alleggerito	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (5 cm)</i>	131.0	15.4	11.7	434 607.4
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	89.2	4.5	3.4	125 259.3

- Successivamente, invece, si mostra il calcolo per la contabilizzazione della Carbon Uptake di un singolo cubo di calcestruzzo. Tale elaborato tabellare, infatti, mostra le specifiche necessarie da essere prese in considerazione per la contabilizzazione della Carbon Uptake.

	n° cubi n	A m ²	CLINKER %	UTCC kgCO ₂ /kg	k mm/anno	t anni	DC %	Cpi kg/m ³	CU C3-C4 cub. kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	577 037.0	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	2 057 629.6	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Struttura portante verticale in cls gettato in opera</i>	236 444.4	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (8cm)</i>	315 259.3	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (6cm)</i>	326 518.5	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S9) (9cm)</i>	142 148.1	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (7cm)</i>	84 444.4	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (6cm)</i>	87 259.3	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefab. (interp.) (4 cm)</i>	47 288.9	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato isolante in cls alleggerito (controt.) (6 cm)</i>	309 629.6	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato isolante in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	175 925.9	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (interp.) (6 cm)</i>	253 333.3	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato portante in soletta di cls prefab. (copert.) (6 cm)</i>	363 111.1	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (copert.) (5 cm)</i>	434 607.4	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	125 259.3	0.0	84%	0.41	1.6	50.0	85%	250.0	0.2

- Nel dettaglio, dopo aver calcolato il quantitativo di CU_{C3-C4} appartenente ad un singolo cubo cementizio si moltiplica questo valore per il numero di cubi desunti per ogni singolo elemento preso in considerazione. Nella tabella sottostante, si mostra il calcolo conclusivo della CU_{C3-C4} , il cui ammontare è ottenuto tramite la sottrazione con l'eventuale corrispettivo di Carbon Uptake calcolato in fase di Uso ($B1$) dal medesimo elemento tecnico.

In conclusione, si ricorda che per desumere il quantitativo di CU_{C3-C4} dello scenario S2 è solamente necessario far corrispondere al quantitativo di CU_{C3-C4} S1 una percentuale di carbonatazione del 30%.

Una volta eseguito questo calcolo, si potrà procedere come mostrato nel caso S1, ovvero sottraendo al quantitativo di CU_{C3-C4} S2 il corrispettivo, eventuale, di CU_{B1} .

	CU C3-C4 S1 kgCO ₂ eq	CU B1 kgCO ₂ eq	CU C3-C4 S1 f. kgCO ₂ eq
Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)	97 128.2	3 740.5	93 387.7
Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera	346 344.9	3 740.5	342 604.4
Struttura portante verticale in cls gettato in opera	39 798.9	2 295.8	37 503.0
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (8cm)	53 065.1	9 504.2	43 561.0
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S32) (6cm)	54 960.3	1 756.2	53 204.1
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S9) (9cm)	23 926.7	3 209.2	20 717.5
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (7cm)	14 213.9	2 764.9	11 449.0
Strato portante in lastra di cls prefabbricato (S24) (6cm)	14 687.7	2 043.6	12 644.1
Strato di riv. sup. in blocchi di cls prefab. (interp.) (4 cm)	7 959.8	1 540.4	6 419.4
Strato isolante in cls alleggerito (controt.) (6 cm)	52 117.6	0.0	52 117.6
Strato isolante in cls alleggerito (interp.) (6 cm)	29 612.2	0.0	29 612.2
Strato portante in soletta di cls prefab. (interp.) (6 cm)	42 641.6	4 402.0	38 239.6
Strato portante in soletta di cls prefab. (copert.) (6 cm)	61 119.7	6 615.9	54 503.8
Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)	73 154.1	0.0	73 154.1
Strato di sostegno in cls alleggerito (contr.) (5 cm)	21 083.9	1 101.0	19 982.9

-889 100.4

ALLEGATO 8 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON DI IMPIANTI E SERVIZI

All'interno di questo Allegato si mostrano i risultati ottenuti, all'interno di ogni singola fase del ciclo di vita, dall'impianto MEP del manufatto edilizio.

Si ricorda inoltre, che come per ogni contabilizzazione effettuata all'interno di questo lavoro di Tesi, per il calcolo dell'Embodied Carbon è stata seguita una procedura metodologica di base, la quale ha permesso un calcolo approssimativo del quantitativo di anidride carbonica correlato al lato impiantistico dell'abitazione.

- In primis, si mostrano i risultati ottenuti per il sistema MEP durante le fasi A1-A3, suddividendo i contributi secondo i singoli elementi di impianto contemplati.

	Superficie m ²	pz. -	Peso kg	EC A1-A3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ³ /m ² /kg	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Pannello fotovoltaico	35.3			302.3	1 m ²	10 665.1
Pompa di calore		1.0		319.4	1 pz	319.4
Pavimento radianti	177.9			7.5	1 m ²	1 329.2
Storage termico			59.5	4.0	1 kg	237.8
Pannello solare	4.0			93.5	1 m ²	373.8
						12 925.4

- Di seguito, sono mostrati i risultati ottenuti per la fase A4, in cui si è preso in considerazione uno scenario di trasporto al cantiere di tipo locale (50 km).

	N t	Autoc. t	A l/100km	B l/100km	C t	Viaggi n.	E (l/km)	Distanza km	F l	Vet. en. kgCO ₂ eq/l	EC A4 kgCO ₂ eq
MEP	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	1.9	3.2	6.1

- Per quanto concerne invece il calcolo delle fasi B2-B3-B4, questo è stato ottenuto associando il 10% delle emissioni contabilizzate durante le fasi A1-A3, come previsto da metodo di base.

Emodied Carbon	EC A1-A3 kgCO ₂ eq	%	EC B2-B3-B4 kgCO ₂ eq
EC B2-B3-B4 (10% EC A1-A3)	12 925.4	10	1 295.5

- Per la contabilizzazione della fase C2, si è seguito un procedimento identico a quello mostrato in precedenza per la fase A4, scegliendo come scenario di trasporto sempre uno scenario di tipo locale.

	N	Autoc.	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vet. en.	EC C2
	t	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
MEP	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	1.9	3.2	6.1

- Di seguito, si riportano i valori conseguiti per le fasi C3-C4, ottenuti tramite impiego del database Ökobaudat.

	C3	C4	C3+C4	Ref. Flo	Quant.	EC C3+C4
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	m ² /m ³ /kg	m ² /m ³ /kg	kgCO ₂ eq
Pannello fotovoltaico	0.0	12.0	12.0	1 m ²	35.3	424.1
Pompa di calore	20.4	3.6	24.0	1 pz	1.0	24.0
Pavimento radianti	6.7	0.0	6.7	1 m ²	177.9	1 189.4
Storage termico	0.6	0.0	0.6	1 kg	59.5	34.1
Pannello solare	1.0	0.2	1.2	1 m ²	4.0	4.8
						1 676.3

- Dopo aver effettuato la rendicontazione di tali valori di EC, e prima di procedere alla contabilizzazione delle emissioni correlate all'impiego di gas refrigerante, si ricorda di come sia doveroso all'interno di una metodologia di base, per ragioni cautelative, considerare e moltiplicare l'ammontare di Embodied Carbon (fino ad ora riscontrato) per un fattore correttivo, pari ad 1,3.

Emodied Carbon	EC	f	EC c.
	kgCO ₂ eq		kgCO ₂ eq
EC (A1-A3; B2-B4; C2-C4)	15 906.4	1.3	20 678.3

- Per concludere, sono state prese in considerazione anche le emissioni delle fasi B1 e C1, che date le loro peculiarità sono state contabilizzate in un secondo momento e naturalmente poi sommate all'ammontare di Embodied Carbon definito prima come cautelativo.

Riguardo alla fase B1, sono state prese in considerazione esclusivamente le emissioni dovute alla perdita di liquido refrigerante della pompa di calore durante lo scenario temporale di riferimento.

Gas refrigerante	T. di perd.	Vita utile	GWP	EC B1
kg	%	anni	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
3.0	0.04	50.0	2 108.0	12 648.0

- Infine, all'interno della fase C1 sono state contabilizzate le emissioni legate alla perdita di refrigerante della pompa di calore, riferito però non allo scenario temporale di riferimento bensì solo all'anno di demolizione C1.

Gas refrigerante	T. di perd.	GWP	EC C1
kg	%	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
3.0	0.02	2 108.0	126.5

ALLEGATO 9 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE D

All'interno di questo Allegato, si mostrano tutti i ragionamenti e le specifiche prese in considerazione per una deduzione, parziale e soprattutto predittiva, del livello di circolarità del manufatto edilizio.

Si specifica inoltre, che tale restituzione si è decisa di consegnarla attraverso una suddivisione, naturalmente in termini di potenziali benefici, per i materiali chiave dedotti e riscontrati all'interno del progetto.

Calcestruzzo gettato in opera	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	-4.0	1 m ³	81.5	70%	57.1	-227.6
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	-3.6	1 m ³	20.5	70%	14.4	-51.9
Calcestruzzo prefabbricato	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (10 cm)</i>	-0.6	1 m ³	19.9	70%	13.9	-8.2
<i>Strato di riv. sup. in blocchi di cls (4 cm)</i>	-4.1	1 m ³	1.7	80%	1.3	-5.5
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (9 cm)</i>	-0.4	1 m ²	65.0	70%	45.5	-20.1
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (8 cm)</i>	-0.4	1 m ²	192.5	70%	134.8	-52.8
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (7 cm)</i>	-0.3	1 m ²	56.0	70%	39.2	-13.4
<i>Strato portante in lastra di cls prefabbricato (6 cm)</i>	-0.3	1 m ²	471.7	70%	330.2	-97.1
<i>Strato isolante in cls alleggerito (7 cm)</i>	-0.6	1 m ³	17.3	70%	12.1	-7.1
Materiale plastico (igloo)	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	-0.7	1 kg	873.6	70%	611.5	-450.7
Ceramica	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. sup. in ceramica (2 cm)</i>	-0.3	1 m ²	177.9	70%	124.6	-33.1
Polistirene Espanso	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso</i>	-23.2	1 m ³	38.7	70%	27.1	-628.8
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso</i>	-41.7	1 m ³	4.6	70%	3.2	-135.1
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso</i>	-23.2	1 m ³	4.7	70%	3.3	-76.7
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso</i>	-23.2	1 m ³	31.3	70%	21.9	-508.5
<i>Strato isolante a base di polistirene espanso</i>	-23.2	1 m ³	29.0	70%	20.3	-471.2

Alluminio	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Serramento ed elemento soglia in alluminio</i>	-98.81	1 m ²	11.1	90%	9.98	-985.7
<i>Grondaia in alluminio</i>	-0.3	1 kg	33.6	90%	30.22	-9.1
<i>Strato di riv. sup. in alluminio (4 cm)</i>	-14.34	1 m ²	134.0	90%	120.65	-1729.4
<i>Schermatura solare in alluminio</i>	-5.15	1 m ²	45.2	90%	40.68	-209.5
Vetro	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Pannellatura in vetro</i>	-0.4	1 m ²	45.2	90%	40.7	-17.9
Legno	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Porte interne in legno</i>	-26.5	1 m ²	18.4	90%	16.6	-439.1
<i>Strato di supporto in legno (10 cm)</i>	-316.7	1 m ³	0.8	90%	0.7	-233.7
Acciaio	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Corpo scala in acciaio</i>	-0.2	1 kg	312.0	90%	280.8	-62.6
<i>Porta garage in acciaio</i>	-13.5	1 m ²	402.1	90%	361.9	-4885.3
<i>Parapetto in acciaio</i>	-1.3	1 kg	697.5	90%	627.8	-844.3
						-12 204.6

ALLEGATI DI ANALISI - VALUTAZIONE WLC BIOCASA SAROTTO 2050



ALLEGATO 10 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLE FASI A1-A3

All'interno di questo primo allegato sono state raccolte e condivise tutte le informazioni necessarie per poter procedere con la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno delle fasi A1-A3.

Nello specifico, le informazioni dedotte sono afferenti a diverse tipologie come, ad esempio di:

- *di tipo geometrico (volume e superficie)*
- *di peso specifico (densità)*
- *di rifiuto prodotto (fpro)*
- *di impatto ambientale (ovvero di Embodied Carbon unitaria)*



STRUTTURA DI FONDAZIONI

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	Fat. cor. fA1-A3	Mat _{Dab r} kg	Mat _{tj} kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)	205.0	20.5	2 000.0	41 000.0	5%	2 050.0	43 050.0	259.3	1 m ³	5 315.7
Struttura portante orizz. a platea in cls gettato in opera	205.0	73.1	2 200.0	160 820.0	5%	8 041.0	168 861.0	259.3	1 m ³	18 954.8
										24 270.5



PARETE PERIMETRALE P1

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	Fat. cor. fA1-A3	Mat _{Dab r} kg	Mat _{tj} kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di finitura int. in intonaco di calce (1 cm)	193.5	2.2	1 800.0	3 992.4	5%	199.6	4 192.0	129.1	1 m ³	286.3
Strato isolante in fibra di legno (6 cm)	193.5	11.5	50.0	577.0	9%	51.9	628.9	107.5	1 m ³	1 240.6
Strato isolante in fibra di legno (6 cm)	193.5	11.5	50.0	577.0	9%	51.9	628.9	107.5	1 m ³	1 240.6
Strato isolante in fibra di legno (14 cm)	193.5	26.9	50.0	1 347.0	9%	121.2	1 498.2	107.5	1 m ³	2 896.1
Strato portante in Xlam (10 cm)	193.5	19.2	420.0	8 080.0	1%	80.8	8 161.6	57.7	1 m ³	1 110.9
Strato di tenuta al vapore	193.5	0.2	1 100.0	209.0	9%	18.8	227.8	2.6	1 m ²	508.1
Strato di finitura est. in listellatura lignea (5 cm)	193.5	3.6	420.0	1 491.0	9%	134.2	1 625.2	37.3	1 m ³	132.3
										7 414.8



PARETE PERIMETRALE P2

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	Fat. cor. fA1-A3	Mat _{Dab r} kg	Mat _{tj} kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di finitura int. in intonaco di calce (1 cm)	56.0	0.5	1 800.0	889.2	5%	44.5	933.7	129.1	1 m ³	63.8
Strato isolante in fibra di legno (6 cm)	56.0	3.0	50.0	148.0	9%	13.3	161.3	107.5	1 m ²	318.2
Strato portante in Xlam (10 cm)	56.0	4.9	420.0	2 047.8	1%	20.7	2 095.5	57.7	1 m ³	285.2
Strato isolante in fibra di legno (4 cm)	56.0	2.0	50.0	98.5	9%	8.9	107.4	107.5	1 m ³	211.8
Strato di tenuta al vapore	56.0	0.0	1 100.0	53.9	9%	4.9	58.8	2.6	1 m ²	147.8
Strato di finitura est. in listellatura lignea (5 cm)	56.0	1.8	420.0	758.1	9%	68.2	826.3	37.3	1 m ³	67.3
										1 094.1

**PARETE INTERNA P3**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)	64.0	0.9	300.0	273.9	5%	13.7	287.6	37.3	1 m ³	34.0
Strato portante in telaio ligneo (10 cm)	64.0	1.1	500.0	550.0	5%	27.5	577.5	37.3	1 m ³	41.0
Strato isolante in fibra di legno (8 cm)	64.0	4.9	50.0	243.5	9%	21.9	265.4	107.5	1 m ³	523.5
Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)	64.0	0.9	300.0	273.9	5%	13.7	287.6	37.3	1 m ³	34.0

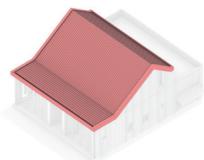
632.6**SOLAIO CONTROTERRA S1**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato di intercapedine (igloo) (25 cm)	131.0	672.0	1.3	873.6	1%	8.7	882.3	3.7	1 kg	3 258.5
Strato di sostegno in cls alleggerito (7 cm)	131.0	9.2	1 000.0	9 210.0	1%	92.1	9 302.1	184.4	1 m ³	1 698.3
Strato isolante in XPS (8 cm)	131.0	10.5	110.0	1 155.0	9%	104.0	1 259.0	94.5	1 m ³	992.3
Strato di tenuta al vapore	131.0	0.1	1 100.0	143.0	9%	12.9	155.9	2.6	1 m ²	345.8
Strato di sostegno in cls alleggerito (10 cm)	131.0	13.2	1 600.0	21 056.0	1%	120.6	21 266.6	184.4	1 m ³	2 426.7
Strato di sostegno in cls alleggerito (10 cm)	131.0	2.6	550.0	1 446.5	5%	72.3	1 518.8	5.9	1 m ²	774.2

9 495.9**SOLAIO INTERPIANO S2**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Strato portante in Xlam (16 cm)	89.2	14.3	420.0	9 094.8	1%	59.9	6 049.1	57.7	1 m ³	823.4
Strato di sostegno in cls alleggerito (6 cm)	89.2	5.3	1 000.0	1 124.7	1%	53.4	5 393.4	184.4	1 m ³	984.7
Strato isolante in fibra di legno (10 cm)	89.2	4.7	110.0	1 124.7	9%	46.7	565.9	107.5	1 m ³	507.4
Strato di tenuta al vapore	89.2	0.1	1 100.0	155.9	9%	12.9	155.9	2.6	1 m ²	235.4
Strato di sostegno in cls alleggerito (5 cm)	89.2	4.5	1 600.0	375.4	1%	71.2	7 191.2	184.4	1 m ²	820.6
Strato di rivestimento superiore in legno (2 cm)	46.9	0.9	550.0	1 097.5	5%	25.9	542.9	5.9	1 m ²	277.4
Strato di rivestimento sup. in legno per esterni (4 cm)	42.2	1.3	550.0	297.8	5%	34.7	727.7	5.9	1 m ²	249.5

5 677.6



SOLAIO DI COPERTURA S3

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato portante in Xlam (16 cm)</i>	134.0	21.4	420.0	9 004.8	1%	90.0	9 094.8	57.7	1 m ³	1 237.9
<i>Strato isolante in fibra di legno (7 cm)</i>	134.0	9.4	110.0	1 031.8	9%	92.9	1 124.7	107.5	1 m ³	1 008.4
<i>Strato isolante in fibra di legno (7 cm)</i>	134.0	9.4	110.0	1 031.8	9%	92.9	1 124.7	107.5	1 m ³	1 008.4
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	134.0	0.1	1 100.0	143.0	9%	12.9	155.9	2.6	1 m ²	353.8
<i>Strato di supporto in telaio ligneo (4 cm)</i>	134.0	0.7	550.0	357.5	5%	17.9	375.4	37.3	1 m ³	24.2
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	134.0	0.1	1 100.0	143.0	9%	12.9	155.9	2.6	1 m ²	353.8
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo (1.5 cm)</i>	134.0	2.0	520.0	1 045.2	5%	52.3	1 097.5	147.6	1 m ³	296.7
<i>Strato di rivestimento superiore in alluminio (2 cm)</i>	134.0	5.5	2.2	294.8	1%	2.9	297.8	23.1	1 m ²	3 097.0
										7 380.1



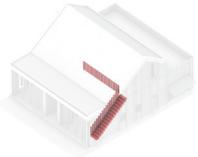
INFISSI ESTERNI

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	45.2	0.4	20.0	904.0	1%	9.0	913.0	36.4	1 m ²	1 645.3
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	11.1	0.8	460.0	368.0	1%	3.7	317.7	3.5	1 m	509.5
										2 154.8



PORTE

	A m ²	V m ³	Densità ρ	MatDab kg	f. pro. %	MatDab r kg	Matj kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Porta in legno lamellare</i>	18.4	1.1	550.0	577.5	1%	5.8	583.3	37.7	1 m ²	692.5
<i>Porta garage in legno</i>	14.5	0.4	550.0	220.0	1%	2.2	222.2	37.7	1 m ²	546.7
										1 239.2

**CORPO SCALA**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Corpo scala in legno</i>	4.1	1.0	460.0	469.2	1%	4.7	473.9	37.3	1 m ³	38.0
<i>Elemento di protezione parapetto in legno</i>	5.4	0.2	460.0	74.5	1%	0.7	75.3	4.8	1 m ²	25.8
										63.8

**IMPIANTO SMALTIMENTO LIQUIDI**

	A m ²	V m ³	Densità ρ	Mat _{Dab} kg	f. pro. %	Mat _{Dab r} kg	Mat _j kg	EC A1-C3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo m ³ /m ²	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
<i>Elemento di scarico acque meteoriche in alluminio (grondaia)</i>	14.6	/	2.3	33.6	1%	0.3	33.9	1.9	1 kg	64.6
										64.6

ALLEGATO 11 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE A4

All'interno di questo secondo allegato sono stati raccolte e condivise tutte le informazioni ricercate e collezionate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno della fase di Trasporto al cantiere, ovvero la fase del ciclo di vita A4.

Nello specifico, le informazioni dedotte per il calcolo di questa fase sono state di:

- peso (chilogrammi di prodotto di Bill of quantities)*
- di tipologia di mezzo impiegato (ovvero tipologia di autocarro contemplato)*
- di numero di viaggio necessari*
- di caratteristiche specifiche del viaggio (riportando parametri come, ad esempio, di consumo specifico E o di consumo del mezzo F)*

	N	Autocarro	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vettore en.	EC A4
	t	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	43.1	24-40 t	22.7	14.4	26.0	2.0	122.9	50.0	61.4	3.2	199.0
<i>Struttura portante orizz. a platea in cls</i>	168.9	24-40 t	22.7	14.4	26.0	7.0	1 686.7	50.0	843.3	3.2	2 732.4
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	9.3	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	18.2	50.0	9.1	3.2	29.5
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S2)</i>	5.4	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	10.6	50.0	5.3	3.2	17.1
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	21.3	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	30.3	50.0	15.2	3.2	49.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S2)</i>	7.2	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	14.1	50.0	7.0	3.2	22.8
<i>Strato portante in Xlam (P1)</i>	8.2	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	16.0	50.0	8.0	3.2	25.9
<i>Strato portante in Xlam (P2)</i>	2.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	8.6	50.0	4.3	3.2	14.0
<i>Strato portante in Xlam (S2)</i>	6.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	11.8	50.0	5.9	3.2	19.2
<i>Strato portante in Xlam (S3)</i>	9.1	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	17.8	50.0	8.9	3.2	28.9
<i>Strato isolante in fibra di legno (P1)</i>	2.7	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	11.2	50.0	5.6	3.2	18.2
<i>Strato isolante in fibra di legno (P2)</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.1	50.0	0.6	3.2	1.8
<i>Strato isolante in fibra di legno (P3)</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.1	50.0	0.5	3.2	1.8
<i>Strato isolante in fibra di legno (S2)</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.3	50.0	1.2	3.2	3.8
<i>Strato isolante in fibra di legno (S3)</i>	2.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	9.3	50.0	4.6	3.2	15.0
<i>Strato di fin. est. in listell. lignea (P1)</i>	1.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.7	50.0	3.3	3.2	10.8
<i>Strato di fin. est. in listel. lignea (P2)</i>	0.8	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.4	50.0	1.7	3.2	5.5
<i>Strato di rivestimento in legno (P3)</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.4	50.0	1.2	3.2	3.8
<i>Strato portante in telaio ligneo (P3)</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.4	50.0	1.2	3.2	3.8
<i>Strato di supporto in telaio ligneo (S3)</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.5	50.0	0.8	3.2	2.5
<i>Strato di riv. superiore in legno (S1)</i>	1.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.2	50.0	3.1	3.2	10.1
<i>Strato di riv. superiore in legno (S2)</i>	1.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	5.2	50.0	2.6	3.2	8.5
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo (S3)</i>	1.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	4.5	50.0	2.3	3.2	7.3
<i>Porte interne in legno</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.4	50.0	1.2	3.2	3.9
<i>Porta garage in legno</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.9	50.0	0.5	3.2	1.5
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.5	50.0	0.8	3.2	2.5
<i>Corpo scala in legno</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.9	50.0	1.0	3.2	3.2
<i>Parapetto in legno</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.3	50.0	0.2	3.2	0.5
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.1	50.0	0.1	3.2	0.2
<i>Strato di fin. int. in int. di calce (P1)</i>	4.2	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	8.2	50.0	4.1	3.2	13.3
<i>Strato di fin. int. in int. di calce (P2)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.8	50.0	1.9	3.2	6.2
<i>Strato isolante in XPS (S1)</i>	1.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	5.2	50.0	2.6	3.2	8.4
<i>Strato di intercapedine (igloo) (S1)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.6	50.0	1.8	3.2	5.9
<i>Strato di riv. sup. in alluminio (S3)</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.2	50.0	0.6	3.2	2.0
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.8	50.0	1.9	3.2	6.1
<i>Strato di tenuta al vapore (P1)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.9	50.0	0.5	3.2	1.5

<i>Strato di tenuta al vapore (P2)</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.2	50.0	0.1	3.2	0.4
<i>Strato di tenuta al vapore (S1)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	50.0	0.3	3.2	1.0
<i>Strato di tenuta al vapore (S2)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.6	50.0	0.3	3.2	1.0
<i>Strato di tenuta al vapore (S3)</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.3	50.0	0.6	3.2	2.1

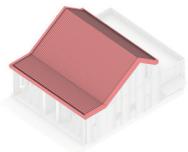
3 290.5

ALLEGATO 12 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE A5

In questo terzo allegato, si procede con la presentazione degli steps necessari per una rendicontazione, il più possibile completa, della fase A5 ovvero della fase del ciclo di vita riguardante la Costruzione del manufatto.

Nel dettaglio, a differenza dei due precedenti allegati, in questo non sarà presentata una sola tabella riassuntiva, bensì saranno mostrati in due diversi elaborati i risultati ottenuti, in termini di emissioni, riguardanti prima al sollevamento degli elementi prefabbricati e in seguito quelli concerni alla miscelazione degli elementi gettati in opera.

RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio di copertura (S3)</i>	0.25	134.00	33.50	1 954.90	0.26	28.00	7.22	1 962.13



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio interpiano (S2)</i>	0.04	89.16	3.57	208.12	0.03	28.00	0.77	208.89



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Solaio controterra (S1)</i>	0.04	131.00	5.24	305.78	0.04	28.00	1.13	306.91



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Corposcala</i>	1.00	5.00	5.00	291.78	0.04	28.00	1.08	292.85

RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete perimetrale (P1)</i>	0.13	192.45	25.66	1 497.40	0.20	28.00	5.53	1 502.93



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete perimetrale (P2)</i>	0.13	56.00	7.47	435.72	0.20	28.00	1.61	437.33



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ²	Superficie m ²	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Parete interna (P3)</i>	0.13	63.79	8.51	496.33	0.07	28.00	1.83	498.17

RISULTATI OTTENUTI A SEGUITO DI IMPIEGO DI AUTOGRÙ



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	0.10	20.50	2.05	6.74	0.00	28.00	0.03	6.77



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante orizzontale</i>	0.10	73.10	7.31	24.03	0.00	28.00	0.10	24.13



Elementi edilizi	Prod. orar. hr/m ³	Volume m ³	Ore lavoro hr	CO ₂ (kg) (kg)	CH ₄ (kg) (kg)	fc n.	CO ₂ eq (kg) (kg)	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Strato di fin. int. intonaco di calce</i>	0.10	2.71	0.27	0.89	0.00	28.00	0.00	0.90

ALLEGATO 13 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE B4

In questo Allegato 4, sono stati riassunti e collezionati tutti i procedimenti presi in considerazione per la deduzione dell'Embodied Carbon nella fase del ciclo di vita B4.

Al fine di una esposizione che possa risultare il più chiara ed esplicita possibile, si presentano in maniera suddivisa e puntuale tutti i valori riscontrati di EC degli elementi edilizi che nel corso dello scenario temporale di riferimento (il quale si ricorda essere pari a 50 anni) vedranno una loro sostituzione e re-installazione.

- Come primo elaborato tabellare, si mostra di seguito l'ammontare dei chilogrammi totali calcolati per la fase di Sostituzione (B4)

Elementi edilizi	CW kg	RF _{B4-j} cor n.	RW kg
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	27.4	1.0	27.4
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	122.0	4.0	488.2
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	3.7	1.0	3.7
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	0.3	1.0	0.3
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.3	2.0	0.7
<i>Parapetto in legno</i>	0.7	1.0	0.7
<i>Porte interne in legno</i>	5.8	1.0	5.8
<i>Porta garage in legno</i>	2.2	1.0	2.2

- A seguire, si è proceduti con il conteggio dell'Embodied Carbon appartenente ai materiali oggetto di sostituzione (calcolo effettuato attraverso impiego del database Ökobaudat)

Elementi edilizi	EC A1-A3 kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	68.1
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	350.1
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	509.5
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	1 645.3
<i>Grondaia in alluminio</i>	64.6
<i>Parapetto in legno</i>	25.8
<i>Porte interne in legno</i>	692.5
<i>Porta garage in legno</i>	546.7

- Si continua con la rendicontazione dell'Embodied Carbon afferente alla fase A4, per i soli chilogrammi di prodotto sostituito

Elementi edilizi	EC A4 kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	3.8
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	19.5
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	2.5
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	6.1
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.2
<i>Parapetto in legno</i>	0.5
<i>Porte interne in legno</i>	3.9
<i>Porta garage in legno</i>	1.5

- Per quanto concerne invece la fase del ciclo di vita A5, si ritiene opportuno rendicontare soltanto il contributo di Embodied Carbon dato dallo strato superficiale in intonaco. Di fatti gli altri contributi, come ad esempio quelli dovuti all'installazione di un nuovo serramento, si ritengono assolutamente trascurabili o nulli.

Elementi edilizi	EC A5 kgCO ₂ eq
<i>Strato di finitura in intonaco di calce</i>	0.9

- Nel quinto elaborato tabellare a pagina seguente, invece, si riportano i valori desunti all'interno delle fasi del ciclo di vita C2-C4. Come si può dedurre dalle tabelle sottostanti, all'interno di questa fase sono stati riportati due diversi scenari di demolizione, al fine di contabilizzare anche in questa fase i contributi, in termini di Embodied Carbon, dati dai due diversi scenari di smaltimento rifiuti contemplati (i quali si ricordano essere gli scenari 100% e 70-30%).

Elementi edilizi	EC C2-C4 RW S1
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	59.1
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	0.5
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	7.9
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0
<i>Parapetto in legno</i>	1.6
<i>Porte interne in legno</i>	12.5
<i>Porta garage in legno</i>	4.7

Elementi edilizi	EC C2-C4 RW S2
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	-43.6
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	0.5
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	-2.3
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0
<i>Parapetto in legno</i>	-1.2
<i>Porte interne in legno</i>	-9.2
<i>Porta garage in legno</i>	-3.5

- In conclusione si riportano i risultati ottenuti per la fase B4 attraverso la messa in pratica della formula [12], spiegata all'interno del paragrafo 6.4.3.

Elementi edilizi	EC B4 S1
	kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	131.2
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	1 485.9
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	519.9
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	1 651.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	259.3
<i>Parapetto in legno</i>	27.9
<i>Porte interne in legno</i>	708.9
<i>Porta garage in legno</i>	552.9

Elementi edilizi	EC B4 S2 kgCO ₂ eq
<i>Strato di riv. in legno (1.5 cm)</i>	28.3
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	1 485.9
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	509.7
<i>Pannellatura in vetro (4+4 mm)</i>	1 651.4
<i>Grondaia in alluminio</i>	259.3
<i>Parapetto in legno</i>	25.1
<i>Porte interne in legno</i>	687.2
<i>Porta garage in legno</i>	544.6
	5 191.5

ALLEGATO 14 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE C1

All'interno di questo quinto allegato si riportano i risultati ottenuti per la fase di Demolizione C1.

In tale fase le emissioni di anidride carbonica sono state suddivise e ricondotte a due differenti tipologie di rifiuto e quindi a due differenti tipologie di Demolizione, nel dettaglio sono stati contabilizzati:

- i chilogrammi di rifiuti provenienti da Demolizione in fase d'Uso (DU)*
- i chilogrammi di rifiuti prodotti da Demolizione end-of life (DeoL)*

Infine, si ricorda che i due contributi (i quali concorreranno all'ammontare finale della fase C1) sono stati dedotti tramite impiego sempre del database Ökobaudat.

	C1	Ref. Flo	Quant. Corrispondente	RFB4-j cor.	ECC1DU	ECC1DEOL
	kgCO ₂ eq	m ³ /m ² /kg	m ³ /m ² /kg	n.	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	0.67	1 m ³	20.50	0.00	0.00	13.74
<i>Struttura portante oriz. a platea in cls</i>	0.61	1 m ³	73.10	0.00	0.00	44.59
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	0.11	1 m ³	9.21	0.00	0.00	1.01
<i>Strato di sostegno in cls alleg.(S2)</i>	0.11	1 m ³	5.34	0.00	0.00	0.59
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	0.11	1 m ³	13.16	0.00	0.00	1.45
<i>Strato di sostegno in cls alleg.(S2)</i>	0.00	1 m ³	19.24	0.00	0.00	0.00
<i>Strato portante in Xlam (P1)</i>	0.00	1 m ³	4.94	0.00	0.00	0.00
<i>Strato portante in Xlam (P2)</i>	0.00	1 m ³	14.26	0.00	0.00	0.00
<i>Strato portante in Xlam (S2)</i>	0.00	1 m ³	21.44	0.00	0.00	0.00
<i>Strato portante in Xlam (S3)</i>	0.00	1 m ³	50.02	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in fibra di legno (P1)</i>	0.00	1 m ³	4.93	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in fibra di legno (P2)</i>	0.00	1 m ³	4.87	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in fibra di legno (P3)</i>	0.00	1 m ³	4.72	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in fibra di legno (S2)</i>	0.00	1 m ³	18.76	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in fibra di legno (S3)</i>	0.00	1 m ³	3.55	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di fin. est. in listell. lignea (P1)</i>	0.00	1 m ³	1.81	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di fin. est. in listel. lignea (P2)</i>	0.00	1 m ³	1.83	1.00	0.00	0.00
<i>Strato di rivestimento in legno (P3)</i>	0.00	1 m ³	1.10	0.00	0.00	0.00
<i>Strato portante in telaio ligneo (P3)</i>	0.00	1 m ³	0.65	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di supporto in telaio ligneo (S3)</i>	0.00	1 m ²	2.63	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di riv. superiore in legno (S1)</i>	0.00	1 m ²	2.20	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di riv. superiore in legno (S2)</i>	0.00	1 m ³	2.01	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo (S3)</i>	0.00	1 m ²	18.37	1.00	0.00	0.00
<i>Porte interne in legno</i>	0.00	1 m ²	14.50	1.00	0.00	0.00
<i>Porta garage in legno</i>	0.00	1 m	146.40	1.00	0.00	0.00
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	0.00	1 m ³	1.02	0.00	0.00	0.00
<i>Corpo scala in legno</i>	0.00	1 m ²	5.40	1.00	0.00	0.00
<i>Parapetto in legno</i>	0.00	1 kg	33.58	4.00	0.00	0.00
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.00	1 m ³	2.22	4.00	0.00	0.00
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (P1)</i>	0.00	1 m ³	0.49	4.00	0.00	0.00
<i>Strato di fin. int. in intonaco di calce (P2)</i>	0.00	1 m ³	131.00	0.00	0.00	0.00
<i>Strato isolante in XPS (S1)</i>	0.00	1 kg	873.60	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di intercapedine (igloo) (S1)</i>	0.02	1 m ²	134.01	0.00	0.00	2.68
<i>Strato di riv. sup. in alluminio (S3)</i>	0.00	1 m ²	45.20	1.00	0.00	0.00
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	0.00	1 m ²	192.45	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di tenuta al vapore (P1)</i>	0.00	1 m ²	56.00	0.00	0.00	0.00

<i>Strato di tenuta al vapore (P2)</i>	0.00	1 m ²	131.00	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di tenuta al vapore (S1)</i>	0.00	1 m ²	89.16	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di tenuta al vapore (S2)</i>	0.00	1 m ²	134.01	0.00	0.00	0.00
<i>Strato di tenuta al vapore (S3)</i>	0.00	1 m ²	134.01	0.00	0.00	0.00
					<i>0.00</i>	<i>64.05</i>

ALLEGATO 15 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE C2

All'interno di questo sesto allegato sono state raccolte e condivise tutte le informazioni ricercate e collezionate per la rendicontazione dell'Embodied Carbon all'interno della fase di Trasporto al sito di smaltimento, C2.

Nello specifico, le informazioni dedotte per il calcolo di questa fase sono state di:

- *peso (chilogrammi di prodotto di Design as built)*
- *di tipologia di mezzo impiegato (ovvero tipologia di autocarro contemplato)*
- *di numero di viaggio necessari*
- *di caratteristiche specifiche del viaggio (riportando parametri come, ad esempio, di consumo specifico E o di consumo del mezzo F)*

	N	Autocarro	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vettore en.	EC C2
	N	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls</i>	41.0	24-40 t	22.7	14.4	26.0	2.0	117.0	50.0	58.5	3.2	189.6
<i>Struttura portante oriz. a platea in cls</i>	160.8	24-40 t	22.7	14.4	26.0	7.0	1 606.3	50.0	803.2	3.2	2 602.3
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	9.2	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	18.0	50.0	9.0	3.2	29.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg.(S2)</i>	5.3	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	10.5	50.0	5.2	3.2	16.9
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (S1)</i>	20.8	24-40 t	22.7	14.4	26.0	1.0	29.6	50.0	14.8	3.2	48.0
<i>Strato di sostegno in cls alleg.(S2)</i>	7.1	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	13.9	50.0	7.0	3.2	22.6
<i>Strato portante in Xlam (P1)</i>	8.1	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	15.8	50.0	7.9	3.2	25.6
<i>Strato portante in Xlam (P2)</i>	2.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	8.5	50.0	4.3	3.2	13.8
<i>Strato portante in Xlam (S2)</i>	6.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	11.7	50.0	5.9	3.2	19.0
<i>Strato portante in Xlam (S3)</i>	9.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	17.6	50.0	8.8	3.2	28.6
<i>Strato isolante in fibra di legno (P1)</i>	2.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	10.3	50.0	5.1	3.2	16.7
<i>Strato isolante in fibra di legno (P2)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.0	50.0	0.5	3.2	1.6
<i>Strato isolante in fibra di legno (P3)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.0	50.0	0.5	3.2	1.6
<i>Strato isolante in fibra di legno (S2)</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.1	50.0	1.1	3.2	3.5
<i>Strato isolante in fibra di legno (S3)</i>	2.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	8.5	50.0	4.2	3.2	13.8
<i>Strato di fin. est. in listell. lignea (P1)</i>	1.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.1	50.0	3.1	3.2	9.9
<i>Strato di fin. est. in listel. lignea (P2)</i>	0.8	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.1	50.0	1.6	3.2	5.1
<i>Strato di rivestimento in legno (P3)</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.3	50.0	1.1	3.2	3.7
<i>Strato portante in telaio ligneo (P3)</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.3	50.0	1.1	3.2	3.7
<i>Strato di supporto in telaio ligneo (S3)</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.5	50.0	0.7	3.2	2.4
<i>Strato di riv. superiore in legno (S1)</i>	1.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	6.0	50.0	3.0	3.2	9.6
<i>Strato di riv. superiore in legno (S2)</i>	1.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	5.0	50.0	2.5	3.2	8.1
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo (S3)</i>	1.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	4.3	50.0	2.2	3.2	7.0
<i>Porte interne in legno</i>	0.6	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	2.4	50.0	1.2	3.2	3.8
<i>Porta garage in legno</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.9	50.0	0.5	3.2	1.5
<i>Serramento ed elem. soglia in legno</i>	0.4	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.5	50.0	0.8	3.2	2.5
<i>Corpo scala in legno</i>	0.5	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.9	50.0	1.0	3.2	3.1
<i>Parapetto in legno</i>	0.1	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.3	50.0	0.2	3.2	0.5
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.1	50.0	0.1	3.2	0.2
<i>Strato di fin. int. in inton. di calce (P1)</i>	4.0	12-24 t	19.3	4.2	12.0	1.0	7.8	50.0	3.9	3.2	12.7
<i>Strato di fin. int. in inton. di calce (P2)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	1.8	3.2	5.9
<i>Strato isolante in XPS (S1)</i>	1.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	4.8	50.0	2.4	3.2	7.7
<i>Strato di intercapedine (igloo) (S1)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.6	50.0	1.8	3.2	5.8
<i>Strato di riv. sup. in alluminio (S3)</i>	0.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	1.2	50.0	0.6	3.2	2.0
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	0.9	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	1.9	3.2	6.0
<i>Strato di tenuta al vapore (P1)</i>	0.2	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	0.9	50.0	0.4	3.2	1.4

ALLEGATO 16 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON E DELLA CARBON UPTAKE NELLE FASI C3-C4

All'interno di questo settimo allegato, si riporta la fase più complessa della metodologia.

Al fine, di mostrare nella maniera più chiara possibile le procedure e i quantitativi contabilizzati (in termini sia di peso che di impatto) si mostreranno i risultati in maniera meno riassuntiva rispetto agli scorsi allegati.

Nel dettaglio, saranno presentati in primis i risultati ottenuti di Embodied Carbon per lo scenario 100% a discarica e solo in seguito saranno condivisi i risultati ottenuti per lo scenario 70-30%.

In un secondo momento invece saranno mostrati e presi in esame i procedimenti seguiti per la contabilizzazione della Carbon Uptake della fase C3-C4.

- Come primo elaborato tabellare si mostra il conteggio effettuato per la deduzione dei chilogrammi di rifiuti appartenenti alle diverse tipologie di Demolizione contemplate (nel dettaglio, si riportano i chilogrammi di "Demolition Waste", "Construction Waste", "Replacement Waste")

	DW kg	CW kg	RW kg
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	201 820.0	10 091.0	
<i>Strato di sostegno in cls prefabb.</i>	42 726.0	427.3	
<i>Strato portante in X-Lam</i>	25 149.6	251.5	
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	5 573.8	501.6	
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea</i>	2 249.1	202.4	
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	547.8	27.4	27.4
<i>Strato di sup. e portante in telaio ligneo</i>	907.5	45.4	
<i>Strato di rivestimento superiore ligneo</i>	2 656.5	132.8	
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	1 045.2	52.8	
<i>Porte interne in legno</i>	577.5	5.8	5.8
<i>Porta garage in legno</i>	220.0	2.2	2.2
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	368.0	3.7	3.7
<i>Parapetto in legno</i>	74.5	0.7	0.7
<i>Corpo Scala in legno</i>	469.2	4.7	
<i>Grondaia in alluminio</i>	33.6	0.3	0.7
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce</i>	4 881.6	244.1	488.2
<i>Strato isolante in XPS</i>	1 155.0	104.0	
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	873.6	8.7	
<i>Strato di riv.sup. in alluminio</i>	294.8	2.9	
<i>Pannellatura in vetro</i>	9040	9.0	0.3
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	834.9	7.51	
	293 362.2	12 193.0	529.0

- Di seguito invece si mostra uno stralcio tabellare riguardante i valori di emissione desunti dal foglio di calcolo BEIS, per la deduzione del quantitativo di Embodied Carbon dovuto allo smaltimento di determinati materiali. Nel dettaglio, i suddetti valori si riportano dividendoli secondo i più comuni scenari di smaltimento.

	Riuso kgCO ₂ eq	Open-loop kgCO ₂ eq	Closed-loop kgCO ₂ eq	Combustione kgCO ₂ eq	Compostaggio kgCO ₂ eq	Discarica kgCO ₂ eq
<i>Calcestruzzo</i>		0.001	0.001			0.001
<i>Isolanti</i>			0.001			0.001
<i>Mattoni</i>		0.001				0.001
<i>Metallo generico</i>			0.001			0.001
<i>Cartongesso</i>			0.021	0.021		0.072
<i>Legno</i>	-1.650	-1.620	-1.620	1.650	1.650	2.150
<i>Vetro</i>		0.021	0.021	0.021		0.001
<i>Elettronica (batterie di accumulo)</i>		0.021				0.009
<i>Plastica generica</i>		0.021	0.021	0.021		0.009
<i>Materiale medio da costruzione</i>		0.001	0.001	0.021		

• In questo terzo elaborato si riportano i risultati riscontrati, in termini di chilogrammi di anidride carbonica equivalente, per gli elementi edilizi all'interno dello Scenario di smaltimento S1 (100%).

N.B. In rosso sono evidenziate le voci che non concorrono alla contabilizzazione della EC_{C3-C4} bensì della CS_{C3-C4}

	DW S1 kgCO ₂ eq	CW S1 kgCO ₂ eq	RW S1 kgCO ₂ eq
Struttura portante in cls gettato in opera	201.8	10.1	
Strato di sostegno in cls prefabb.	42.7	10.1	
Strato portante in X-Lam	54 071.6	540.7	
Strato isolante in fibra di legno	5.6	0.5	
Strato di finitura est. in listellatura lignea	4 835.6	435.2	58.9
Strato di rivestimento in legno	1 177.8	58.9	
Strato di sup. e portante in telaio ligneo	1 951.1	97.6	
Strato di rivestimento superiore ligneo	5 711.5	285.6	
Strato di supporto in tavolato ligneo	1.0	112.4	
Porte interne in legno	1 241.6	12.4	12.4
Porta garage in legno	473.0	4.7	4.7
Serramento ed elemento soglia in legno	791.2	7.9	7.9
Parapetto in legno	160.2	1.6	1.6
Corpo Scala in legno	1 008.8	10.1	
Grondaia in alluminio	0.0	0.0	0.0
Strato di finitura int. in intonaco di calce	4.9	0.2	0.5
Strato isolante in XPS	1.2	0.1	
Strato di intercapedine (igloo)	7.8	0.1	
Strato di riv.sup. in alluminio	0.3	0.0	
Pannellatura in vetro	0.9	0.0	0.0
Strato di tenuta al vapore	0.8	0.1	
	260.4	20.7	0.5
	71 429.0	1 567.5	85.5

- Nella tabella sottostante invece, si riportano i risultati per quel che concerne lo Scenario 70-30% (genericamente, come visto, definito S2).

Data la volontà di discretizzare il più possibile tale scenario, si prosegue con tre differenti tabelle, le quali mostrano la percentuale di rifiuto posto a processi di riciclo o riuso e quella invece posta a discarica, per tutte e tre le tipologie di rifiuto individuate (DW, CW, RW).

	Perc. ad altro scen.	S2	EC DW S2	Perc. a disc.	S1	EC DW S1
	%	kg	kgCO ₂ eq	%	kg	kgCO ₂ eq
Struttura portante in cls gettato in opera	70%	141 274.0	139.2	30%	60 546.0	60.5
Strato di sostegno in cls prefabb.	70%	29 908.2	29.5	30%	12 817.8	12.8
Strato portante in X-Lam	90%	22 634.6	-37 120.8	10%	2 515.0	-4 023.9
Strato isolante in fibra di legno	80%	4 459.0	-7 312.8	20%	1 114.8	-1 783.6
Strato di finitura est. in listellatura lignea	90%	2 024.2	-3 319.7	10%	224.9	-359.9
Strato di rivestimento in legno	90%	493.0	-788.8	10%	54.8	-87.6
Strato di sup. e portante in telaio ligneo	90%	816.8	-1 339.5	10%	90.8	-145.2
Strato di rivestimento superiore ligneo	80%	2 125.2	-3 485.3	20%	531.3	-850.1
Strato di supporto in tavolato ligneo	80%	836.2	-1 337.9	20%	209.0	-334.5
Porte interne in legno	90%	519.8	-852.4	10%	57.8	-1.6
Porta garage in legno	90%	198.0	-324.7	10%	22.0	-35.2
Serramento ed elemento soglia in legno	90%	331.2	-543.2	10%	36.8	-58.9
Parapetto in legno	90%	67.1	-110.0	10%	7.5	-11.9
Corpo Scala in legno	70%	328.4	-538.6	30%	140.8	-225.2
Grondaia in alluminio	90%	30.2	0.0	10%	3.4	0.0
Strato di finitura int. in intonaco di calce	70%	3 417.1	3.4	30%	1 464.5	1.5
Strato isolante in XPS	70%	808.5	0.8	30%	346.5	0.3
Strato di intercapedine (igloo)	70%	611.5	13.0	30%	262.1	2.3
Strato di riv.sup. in alluminio	90%	265.3	0.3	10%	29.5	0.0
Pannellatura in vetro	90%	813.6	17.3	30%	271.2	0.3
Strato di tenuta al vapore	70%	584.4	0.6	30%	250.5	0.3
			204.0			78.1
			-57 073.7			-7 917.6

	Perc. ad altro scen. %	S2 kg	EC CW S2 kgCO ₂ eq	Perc. a disc. %	S1 kg	EC CW S1 kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	70%	7 063.7	7.0	30%	3 027.3	3.0
<i>Strato di sostegno in cls prefabb.</i>	70%	299.1	0.3	30%	128.2	0.1
<i>Strato portante in X-Lam</i>	90%	226.3	-362.2	10%	25.1	-40.2
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	80%	401.3	-642.1	20%	100.3	-160.5
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea</i>	90%	182.2	-291.5	10%	20.2	-32.4
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	90%	24.7	-40.4	10%	2.7	-4.4
<i>Strato di sup. e portante in telaio ligneo</i>	90%	40.8	-65.3	10%	4.5	-7.3
<i>Strato di rivestimento superiore ligneo</i>	80%	106.3	-170.0	20%	26.6	-42.5
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	80%	41.8	-66.9	20%	10.5	-16.7
<i>Porte interne in legno</i>	90%	5.2	-8.3	10%	0.6	-0.9
<i>Porta garage in legno</i>	90%	2.0	-3.2	10%	0.2	-0.4
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	90%	3.3	-5.3	10%	0.4	-0.6
<i>Parapetto in legno</i>	90%	0.7	-1.1	10%	0.1	-0.1
<i>Corpo Scala in legno</i>	70%	3.3	-5.3	30%	1.4	-2.3
<i>Grondaia in alluminio</i>	90%	0.3	0.0	10%	0.0	0.0
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce</i>	70%	170.9	0.2	30%	73.2	0.1
<i>Strato isolante in XPS</i>	70%	72.8	0.1	30%	31.2	0.0
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	70%	6.1	0.1	30%	2.6	0.0
<i>Strato di riv.sup. in alluminio</i>	90%	2.7	0.0	10%	0.3	0.0
<i>Pannellatura in vetro</i>	90%	8.1	0.2	30%	2.7	0.0
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	70%	52.6	0.1	30%	22.5	0.0
			7.9			3.3
			-1 661.5			-308.3

	Perc.ad altro scen.	S2	EC CW S2	Perc. a disc.	S1	EC CW S1
	%	kg	kgCO ₂ eq	%	kg	kgCO ₂ eq
<i>Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)</i>	90%	24.7	-39.4	10%	2.7	-4.4
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	70%	85.4	0.1	30%	36.6	0.0
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	70%	2.6	-4.1	30%	1.1	1.8
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	90%	0.3	0.0	10%	0.0	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	90%	0.3	0.0	10%	0.0	0.0
<i>Parapetto in legno</i>	90%	0.7	-1.1	10%	0.1	-0.1
<i>Porte interne in legno</i>	90%	5.2	-8.3	10%	0.6	-0.9
<i>Porta garage in legno</i>	90%	2.0	-3.2	10%	0.2	-0.4

	EC CW t.	RFB4-j cor.	EC RW
	kgCO ₂ eq	n.	kgCO ₂ eq
<i>Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)</i>	-43.8	1.0	-43.8
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce (1 cm)</i>	0.1	4.0	0.5
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	-2.3	1.0	-2.3
<i>Pannellatura in vetro (4+4mm)</i>	0.0	1.0	0.0
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	2.0	0.0
<i>Parapetto in legno</i>	-1.2	1.0	-1.2
<i>Porte interne in legno</i>	-9.2	1.0	-9.2
<i>Porta garage in legno</i>	-3.5	1.0	-3.5

0.5

-60.1

- In questo settimo elaborato si riportano i risultati riassunti e riscontrati all'interno dello Scenario di smaltimento S2 (70-30%).

Elementi edilizi	DW S2	CW S2	RW S2
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	199.7	10.0	
<i>Strato di sostegno in cls prefabb.</i>	42.3	0.4	
<i>Strato portante in X-Lam</i>	-41 144.7	-402.4	
<i>Strato isolante in fibra di legno</i>	-9 096.4	-802.6	
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea</i>	-3 679.5	-323.9	
<i>Strato di rivestimento in legno</i>	-876.5	-44.8	-44.8
<i>Strato di sup. e portante in telaio ligneo</i>	-1 484.7	-72.6	
<i>Strato di rivestimento superiore ligneo</i>	-4 335.4	-212.5	
<i>Strato di supporto in tavolato ligneo</i>	-1 672.3	-83.6	
<i>Porte interne in legno</i>	-854.0	-9.2	-9.2
<i>Porta garage in legno</i>	-359.9	-3.5	-3.5
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	-602.0	-5.9	-2.3
<i>Parapetto in legno</i>	-121.9	-1.2	-1.2
<i>Corpo Scala in legno</i>	-763.9	-7.5	
<i>Grondaia in alluminio</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Strato di finitura int. in intonaco di calce</i>	4.8	0.2	0.5
<i>Strato isolante in XPS</i>	1.1	0.1	
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	15.3	0.2	
<i>Strato di riv.sup. in alluminio</i>	0.3	0.0	
<i>Pannellatura in vetro</i>	17.6	0.2	0.0
<i>Strato di tenuta al vapore</i>	0.8	0.1	
	282.0	11.2	0.5
	-64 991.3	-1 969.8	-60.1

- A seguire si riporta la metodologia adottata per desumere il quantitativo di **Carbon Uptake** degli elementi cementizi il cui ammontare, si ricorda, viene contabilizzato all'interno della fase C3-C4 per poi essere decurtato ai quantitativi di EC_{C3-C4} mostrati in precedenza.

Come primo elaborato tabellare, si mostra la procedura impiegata per il conteggio dei cubi (da lato 30 x 30 mm) prodotti dalle operazioni di demolizione per ogni elemento tecnico cementizio riscontrato.

Calcestruzzo gettato in opera	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	205.0	20.5	15.6	577 037.0
<i>Struttura portante orizzontale in cls gettato in opera</i>	205.0	73.1	55.6	2 057 629.6
Massetto Alleggerito	m²	m³	m³ sottratto	n° cubi
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (7 cm)</i>	131.0	9.2	7.0	259 244.4
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (6 cm)</i>	89.2	5.3	4.1	150 311.1
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (10 cm)</i>	131.0	13.2	10.0	370 429.6
<i>Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)</i>	89.2	4.5	3.4	125 259.3

- Successivamente, invece, si mostra il calcolo per la contabilizzazione della Carbon Uptake di un singolo cubo di calcestruzzo. Tale elaborato tabellare, infatti, mostra le specifiche necessarie da essere prese in considerazione per la contabilizzazione della Carbon Uptake.

	n° cubi n	A m ²	CLINKER %	UTCC kgCO ₂ /kg	k mm/anno	t anni	DC %	Cpi kg/m ³	CU C3-C4 cub. kgCO ₂ eq
<i>Sottofondo di protezione in cls get. (10 cm)</i>	577 037.0	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2
<i>Struttura portante oriz. a platea in cls get.</i>	2 057 629.6	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (controt.) (7 cm)</i>	259 244.4	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (interp.) (6 cm)</i>	150 311.1	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (controt.) (10 cm)</i>	370 429.6	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2
<i>Strato di sostegno in cls alleg. (interp.) (5 cm)</i>	125 259.3	0.01	0.8	0.5	1.6	50.0	0.9	250	0.2

• Nel dettaglio, dopo aver calcolato il quantitativo di CU_{C3-C4} appartenente ad un singolo cubo cementizio si moltiplica questo valore per il numero di cubi desunti per ogni singolo elemento preso in considerazione. Nella tabella sottostante, si mostra il calcolo conclusivo della CU_{C3-C4} , il cui ammontare è ottenuto tramite la sottrazione con l'eventuale corrispettivo di Carbon Uptake calcolato in fase di Uso ($B1$) dal medesimo elemento tecnico.

In conclusione, si ricorda che per desumere il quantitativo di CU_{C3-C4} dello scenario $S2$ è solamente necessario far corrispondere al quantitativo di CU_{C3-C4} $S1$ una percentuale di carbonatazione del 30%.

Una volta eseguito questo calcolo, si potrà procedere come mostrato nel caso $S1$, ovvero sottraendo al quantitativo di CU_{C3-C4} $S2$ il corrispettivo, eventuale, di CU_{B1} .

	CU C3-C4 S1 kgCO ₂ eq	CU B1 kgCO ₂ eq	CU C3-C4 S1 f. kgCO ₂ eq
Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)	113 711.0	3 740.5	109 970.5
Struttura portante oriz. a platea in cls gettato in opera	405 476.9	3 740.5	401 736.4
Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (7 cm)	51 086.8	0.0	51 086.8
Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (6 cm)	29 620.3	2 201.0	27 419.3
Strato di sostegno in cls alleggerito (controt.) (10 cm)	72 996.9	0.0	72 996.9
Strato di sostegno in cls alleggerito (interp.) (5 cm)	24 683.6	4 402.0	20 281.6
			-683 491.5

ALLEGATO 17 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON DI IMPIANTI E SERVIZI

All'interno di questo Allegato si mostrano i risultati ottenuti, all'interno di ogni singola fase del ciclo di vita, dall'impianto MEP del manufatto edilizio.

Si ricorda inoltre, che come per ogni contabilizzazione effettuata all'interno di questo lavoro di Tesi, per il calcolo dell'Embodied Carbon è stata seguita una procedura metodologica di base, la quale ha permesso un calcolo approssimativo del quantitativo di anidride carbonica correlato al lato impiantistico dell'abitazione.

- In primis, si mostrano i risultati ottenuti per il sistema MEP durante le fasi A1-A3, suddividendo i contributi secondo i singoli elementi di impianto contemplati.

	Superficie m ²	pz. -	Peso kg	EC A1-A3 kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ³ /m ² /kg	EC A1-A3 tot. kgCO ₂ eq
Pannello fotovoltaico	64.3			302.3	1 m ²	19 422.8
Pompa di calore		1.0		319.4	1 pz	319.4
Pavimento radianti	177.9			7.5	1 m ²	1 329.2
Storage termico			59.5	4.0	1 kg	237.8
						21 309.2

- Di seguito, sono mostrati i risultati ottenuti per la fase A4, in cui si è preso in considerazione uno scenario di trasporto al cantiere di tipo locale (50 km).

	N t	Autoc. t	A l/100km	B l/100km	C t	Viaggi n.	E (l/km)	Distanza km	F l	Vet. en. kgCO ₂ eq/l	EC A4 kgCO ₂ eq
MEP	1.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	2.7	3.2	8.6

- Per quanto concerne invece il calcolo delle fasi B2-B3-B4, questo è stato ottenuto associando il 10% delle emissioni contabilizzate durante le fasi A1-A3, come previsto da metodo di base.

	EC A1-A3 kgCO ₂ eq	%	EC B2-B3-B4 kgCO ₂ eq
Emodied Carbon			
EC B2-B3-B4 (10% EC A1-A3)	21 309.2	10	2 130.9

- Per la contabilizzazione della fase C2, si è seguito un procedimento identico a quello mostrato in precedenza per la fase A4, scegliendo come scenario di trasporto sempre uno scenario di tipo locale.

	N	Autoc.	A	B	C	Viaggi	E	Distanza	F	Vet. en.	EC C2
	t	t	l/100km	l/100km	t	n.	(l/km)	km	l	kgCO ₂ eq/l	kgCO ₂ eq
MEP	1.3	<7.5 t	13.0	1.4	3.5	1.0	3.7	50.0	2.7	3.2	8.6

- Di seguito, si riportano i valori conseguiti per le fasi C3-C4, ottenuti tramite impiego del database Ökobaudat.

	C3	C4	C3+C4	Ref. Flo	Quant.	EC C3+C4
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	m ² /m ³ /kg	m ² /m ³ /kg	kgCO ₂ eq
Pannello fotovoltaico	0.0	12.0	12.0	1 m ²	64.3	772.3
Pompa di calore	20.4	3.6	24.0	1 pz	1.0	24.0
Pavimento radianti	6.7	0.0	6.7	1 m ²	177.9	1 189.4
Storage termico	0.6	0.0	0.6	1 kg	59.5	34.1
						2 019.8

- Dopo aver effettuato la rendicontazione di tali valori di EC, e prima di procedere alla contabilizzazione delle emissioni correlate all'impiego di gas refrigerante, si ricorda di come sia doveroso all'interno di una metodologia di base, per ragioni cautelative, considerare e moltiplicare l'ammontare di Embodied Carbon (fino ad ora riscontrato) per un fattore correttivo, pari ad 1,3.

Emodied Carbon	EC	f	EC c.
	kgCO ₂ eq		kgCO ₂ eq
EC (A1-A3; B2-B4; C2-C4)	25 477.1	1.3	33 120.3

- Per concludere, sono state prese in considerazione anche le emissioni delle fasi B1 e C1, che date le loro peculiarità sono state contabilizzate in un secondo momento e naturalmente poi sommate all'ammontare di Embodied Carbon definito prima come cautelativo.

Riguardo alla fase B1, sono state prese in considerazione esclusivamente le emissioni dovute alla perdita di liquido refrigerante della pompa di calore durante lo scenario temporale di riferimento.

Gas refrigerante	T. di perd.	Vita utile	GWP	EC B1
kg	%	anni	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
3.0	0.04	50.0	2 108.0	12 648.0

- Infine, all'interno della fase C1 sono state contabilizzate le emissioni legate alla perdita di refrigerante della pompa di calore, riferito però non allo scenario temporale di riferimento bensì solo all'anno di demolizione C1.

Gas refrigerante	T. di perd.	GWP	EC C1
kg	%	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
3.0	0.02	2 108.0	126.5

ALLEGATO 18 - DETTAGLI SUL CALCOLO DELL'EMBODIED CARBON NELLA FASE D

All'interno di questo Allegato, si mostrano tutti i ragionamenti e le specifiche prese in considerazione per una deduzione, parziale e soprattutto predittiva, del livello di circolarità del manufatto edilizio.

Si specifica inoltre, che tale restituzione si è decisa di consegnarla attraverso una suddivisione, naturalmente in termini di potenziali benefici, per i materiali chiave dedotti e riscontrati all'interno del progetto.

Calcestruzzo gettato in opera	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Struttura portante in cls gettato in opera</i>	-4.0	1 m ³	73.1	70%	57.1	-204.2
<i>Sottofondo di protezione in cls gettato in opera (10 cm)</i>	-3.6	1 m ³	20.5	70%	14.4	-51.9
Calcestruzzo prefabbricato	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strati di sostegno in cls alleggerito</i>	-0.6	1 m ³	32.2	70%	22.6	-13.3
Materiale plastico (igloo)	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato di intercapedine (igloo)</i>	-0.7	1 kg	873.6	70%	611.5	-450.7
Materiale a base lignea	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato portante in X-Lam</i>	-238.7	1 m ³	59.9	90%	53.9	-12 864
<i>Strato di finitura est. in listellatura lignea (5 cm)</i>	-316.7	1 m ³	5.3	90%	4.8	-1 526.3
<i>Strato di rivestimento in legno (1.5 cm)</i>	-316.7	1 m ³	1.83	80%	1.5	-462.6
<i>Strato di rivestimento superiore in legno (2 cm)</i>	-3.3	1 m ²	220.2	80%	176.1	-586.5
<i>Strato isolante in fibra di legno (4 cm)</i>	-84.3	1 m ³	83.3	80%	66.6	-5 619.8
<i>Serramento ed elemento soglia in legno</i>	-1.53	1 m	146.4	90%	131.8	-201.8
<i>Porte interne in legno</i>	-26.5	1 m ²	18.4	90%	16.5	-438.1
<i>Porta garage in legno</i>	-26.5	1 m ²	14.5	90%	13.0	-345.8
<i>Strato di supporto in telaio ligneo (4 cm)</i>	-316.7	1 m ³	0.7	90%	0.6	-185.3
<i>Corpo scala in legno</i>	-316.7	1 m ³	1.0	70%	0.7	-226.1
<i>Elemento di protezione parapetto in legno</i>	-7.14	1 m ²	5.4	90%	4.9	-34.7
<i>Strato di supporto in pannello OSB (1.5 cm)</i>	-227.9	1 m ³	2.01	80%	1.6	-366.5

Alluminio	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Grondaia in alluminio</i>	-0.3	1 kg	33.6	90%	30.22	-9.0
<i>Strato di riv. sup. in alluminio (4 cm)</i>	-14.34	1 m ²	134.0	90%	120.65	-1729.4
Vetro	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Pannellatura in vetro</i>	-0.4	1 m ²	45.2	90%	40.7	-17.9
Polistirene Espanso	EC D kgCO ₂ eq	Ref. Flo. m ² /m ³ /kg	Quant. tot. m ² /m ³ /kg	Perc. di reimpiego %	Quant. corr. m ² /m ³ /kg	EC D tot. kgCO ₂ eq
<i>Strato Isolante in XPS</i>	-41.42	1 m ³	10.5	90%	7.35	-304.4
						- 25 640.7

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo lavoro di Tesi, desidero ringraziare tutte le persone che durante questi anni hanno cercato, in ogni modo, di aiutarmi a crescere sotto il punto di vista sia umano sia professionale.

Innanzitutto, ringrazio i miei relatori di Tesi, il professor Roberto Giordano e Jacopo Andreotti che hanno sempre dimostrato non solo interesse per la realizzazione e il compimento del lavoro, ma anche pazienza e un'instancabile voglia di fare "le cose per bene", dandomi la possibilità di vedere da vicino un mondo accademico intraprendente, affamato di conoscenza e voglioso di formare, in maniera differente, gli studenti.

Ringrazio Mauro Sarotto, il quale ha dedicato tempo, curiosità e pazienza ad ogni mia richiesta e dubbio in merito al progetto.

Ringrazio mio padre e mia madre, che in questi anni hanno sopportato, umanamente ed economicamente, ogni mia scelta. Fin dai miei primi anni di vita mi avete sempre insegnato l'importanza della cultura, l'importanza di formare un pensiero critico sulla realtà che mi circonda, con l'intento di spingermi a cambiare le cose, di sognare in grande e, soprattutto, di credere nel prossimo. Sempre.

Ringrazio mio fratello, colui che sempre e da sempre è stato tutto. Un fratello, un papà, un amico. L'assenza di competizione, uno nei confronti dell'altro, fa sì che ancora oggi uno spera ed esulti per i successi del fratello. La certezza di avere al mondo una persona che farebbe di tutto per me, oltre a darmi sicurezza, mi fa sentire protetto e fortunato. Il tuo non arrendersi mai, il tuo continuare a correre e dare il 100%, sempre, mi fa ricordare della fame che devo conservare affinché io non diventi uno dei tanti.

A mia sorella, che forse hai scelto la via più tortuosa, la più difficile. Ci sono strade che nessuno vuole battere e, per questo motivo, gli altri spesso preferiscono abbandonare colui che le sta solcando. È la natura umana, te non ti arrendere. Se hai un obiettivo, seguilo. Fregatene del giudizio altrui. Credi in te stessa.

Ringrazio mio nonno e mia nonna. Avete costruito tutto con le vostre forze e con la vostra testa. Vi ammiro e vi voglio bene. Sarete per sempre al centro del mio cuore.

Ad Anna, Romano e Daniele che mi hanno accolto come un figlio e un fratello a casa loro dal primo momento e, anche nella distanza, hanno sempre dimostrato sinceramente il loro affetto nei miei confronti. Siete speciali e sono fortunato ad aver trovato delle persone del genere nella mia vita, vi voglio bene.

Ai miei amici. Tutti. Sempre più spesso i ringraziamenti per una tesi stanno diventando una sorta di attestato di stima. Un qualcosa che non mi piace, che personalmente reputo di cattivo gusto e, soprattutto, che giustifichi il "non detto" all'interno di un rapporto di amicizia. Vi ho sempre detto dell'amore fraterno che lega tanti di noi. In questo ultimo periodo, nonostante la lontananza, ho avuto la fortuna di vedere come diverse persone negli anni hanno continuato ad aver la premura e l'affetto di sentirmi, di scrivermi e di chiedermi come stessi. Con i più, il rapporto non si è mai interrotto, anzi, si è trasformato evolvendosi in un qualcosa di più sincero e profondo. So che posso fare affidamento su di voi. Vi voglio bene.

A tutti gli amici del Politecnico, che in questi anni hanno cercato, con la loro generosità, di coinvolgermi. Ho conosciuto tante belle e brave persone, a cui auguro il meglio per la loro vita. Un ringraziamento speciale a Matteo con cui ho condiviso, oltre alle ansie per il futuro, la passione per l'architettura, per la politica e per il cinema. Sei stato un compagno di viaggio fondamentale e ti ringrazio dal profondo del cuore per tutti i messaggi e le dimostrazioni di affetto che hai speso per me in questi anni. Mi hai sempre ricordato ed esaltato per le mie capacità e per questo motivo, forse più di tutto, ho un affetto sincero nei tuoi confronti che spero il tempo non riesca a logorare.

Infine, a Laura. Sei stata tante cose in questi anni. Il bilanciamento tra motivazione, affetti e sogni è di difficilissima attuazione. Non so ancora come poterci riuscire. Nonostante ciò, credo che la sincerità possa essere l'unica arma per combattere tutto il malessere che avvolge mi porto dietro e te in questi anni sei sempre stata in prima linea a combattere sinceramente, per me e per il mio benessere. Mi hai accompagnato a Torino, mi hai accompagnato a Copenaghen, ci siamo sentiti infinitesimamente

minuscoli di fronte a tutto quello che dovevo fare per realizzare i miei sogni e i miei obiettivi e, standoci vicini, siamo cresciuti anche noi, sapendo che la difficoltà e la tristezza di certi giorni sarà solo la spinta per la nostra felicità futura. Viva i fatti, non le parole.

Infine, un ricordo a te anima buona. Ti ho voluto tanto bene Teresa, e giuro, che ripensarti mi fa male ancora oggi. A volte piango per come te ne sei andata. Amo l'arte visiva, ma forse la tua uscita è stata fin troppo teatrale. La tua semplicità è stata una delle cose più belle che io abbia mai potuto vedere e la tua naturalezza negli affetti una delle cose più dolci. Mi manchi tanto. Ti voglio tanto bene. Ti parlo spesso e gioco ad immaginare quali risposte potresti darmi. Mi fanno ridere, mi portano felicità.

Per ultimo, come da prassi, a me. Per tutto quello che ho in testa, per ogni sogno che vorrei realizzare. Per quello in cui credo. Per l'impegno che mi ha sempre contraddistinto.

*"Proprio per questo, Sancho, c'è bisogno soprattutto
D'uno slancio generoso, fosse anche un sogno matto."*

BIBLIOGRAFIA

1. Agora Energy Transition. (2022). *Reducing Embodied Carbon in new buildings: RE2020 in France*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://static.agora-energie.wende.de/fileadmin/Success_Stories/BP/BP_FR_RE2020/A-E_272_Succ_Stor_BP_France_RE2020_WEB.pdf
2. Alliance HQE-GBC France. (2022). *Roadmap a pathway to decarbonisation (2050)*. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.hqegbc.org/wp-content/uploads/2022/05/HQE-Roadmap-MP-EXE.pdf>
3. British Standards (BSi). (2008). *PAS 2050:2008 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.carbonconstruct.com/pdf/pas_2050.pdf
4. BUILD, Aalborg Universitet. (2021). *Whole Life Carbon Assessment of 60 buildings*. Disponibile al sito: <https://build.dk/Pages/Whole-Life-Carbon-Assessment-of-60-buildings.aspx>
5. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2022a). *EPDB recast: New provisions need sharpening to hit climate targets*. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2022/01/EPDB-recast-new-provisions-need-sharpening-to-hit-climate-targets.pdf>
6. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2022b). *Reducing carbon emissions over the life of a building: opportunities in the 2022 EPDB Recast*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2022/09/WLC-and-EPDB-policy-briefing_v10.pdf
7. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2022c). *Roadmap to climate-proof buildings and construction How to embed Whole Life Carbon in the EPDB*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2022/01/BPIE_ROADMAP-WLC-EPDB_FINAL.pdf
8. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2023). *Regulierung der Lebenszyklus-THG-Emissionen von Gebäuden*. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2023/09/Regulierung-der-Lebenszyklus-THG-Emissionen-von-Gebauden-DE-Sept-2023.pdf>
9. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), World Green Building Council (WGBC), KU

Leuven. (2023). *Indicate*. Disponibile al sito: <https://www.indicatedata.com/#:~:text=The%2Onational%20INDICATE%20project%20will%20enable%20an%20acceleration%20in%20integration,data%20infrastructure%20and%20agreed%20methodology>

10. European Commission. (2020). *Level(s) European framework for sustainable buildings*. EU Publications. Disponibile al sito: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en
11. European Commission. (2021). *Directive of the European parliament and of the council on the energy performance of buildings (recast)*. European Parliament. Disponibile al sito: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52021PC0802>
12. European Commission. (2023). *Directive of the European parliament and of the council on the energy performance of buildings (recast)*. European Parliament. Disponibile al sito: [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739377/EPRS_ATA\(2023\)739377_EN.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739377/EPRS_ATA(2023)739377_EN.pdf)
13. European Lime Association (EuLA). (2023). *La calce come deposito naturale di carbonio*. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eula.eu/wp-content/uploads/2023/11/La-calce-come-deposito-naturale-di-carbonio.pdf>
14. European Science Hub. (2023). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Disponibile al sito: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en
15. German Federal Ministry for Housing, Urban Development and Building. (2023). *ÖKOBAU-DAT Sustainable Construction Information Portal*. Disponibile al sito: <https://www.oekobau-dat.de/en.html>
16. Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC); UN Environment Programme (UNEP). (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. Nairobi. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_3.pdf
17. Green Building Council Italia (GBC Italia). (2022a). *Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito. Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050*. Green Building Council Italia. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://gbcitalia.org/wp-content/uploads/2022/12/gbcitalia_roadmap_2050.pdf
18. Green Building Council Italia (GBC Italia). (2022b). *La finanza privata e pubblica per la decarbonizzazione del settore edile*. Green Building Council Italia. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://gbcitalia.org/wp-content/uploads/2023/03/REPORT_2022_soluzioni_finanziarie.pdf

19. Green Building Council Italia (GBC Italia). (2022c). *Soluzioni tecnologiche per la decarbonizzazione delle emissioni operative degli edifici*. Green Building Council Italia. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://gbcitalia.org/wp-content/uploads/2023/03/REPORT_2022_soluzioni_tecnologiche_R2MSolution.pdf
20. Green Building Council Italia (GBC Italia). (2022d). *Strumenti per la decarbonizzazione: contabilizzazione dell'Embodied Carbon nel ciclo di vita di un manufatto edilizio*. Green Building Council Italia. Disponibile al sito: <https://gbcitalia.org/2023/04/28/politiche-energetiche-e-decarbonizzazione-del-costruito-la-strada-per-una-transizione-sostenibile/>
21. Green Building Council Italia (GBC Italia). (2023). *Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito. Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050*. Green Building Council Italia. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.london.gov.uk/sites/default/files/lpg_-_wlca_guidance.pdf
22. 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/>
23. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2023). *Efficiency and decarbonization indicators in Italy and in the biggest European Countries. Edition 2023*. ISPRA. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.isprambiente.gov.it/files2023/pubblicazioni/rapporti/r386-2023.pdf>
24. Italy for Climate (I4C). (2022). *Italia Climate Report 2022*. I4C. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://italyforclimate.org/wp-content/uploads/Italy-Climate-Report-2022-Italy-for-Climate-1.pdf>
25. Italy for Climate (I4C). (2023). *La roadmap per la neutralità climatica dell'Italia*. I4C. Disponibile al sito: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://italyforclimate.org/wp-content/uploads/Roadmap-per-la-neutralita-climatica-dellItalia-2023-Italy-for-Climate.pdf>
26. London Energy Transformation Initiative (LETI). (2020). *LETI Embodied carbon primer: Supplementary guidance to the climate emergency design guide*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_8ceffcbcafdb43cf8a19ab9af5073b92.pdf
27. London Energy Transformation Initiative (LETI). (2023a). *LETI Operational Carbon in Whole Life Carbon Assessments. With appendicies*. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_45ad3e95208f-4bebbd1181f1042d513f.pdf
28. London Energy Transformation Initiative (LETI). (2023b). *LETI Operational Modelling*

Guide. How energy performance modelling helps deliver energy targets. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_68369f33aca74bf49edaea562eca81d5.pdf

29. Mayor of London. (2022). *London Plan Guidance: Whole Life Cycle Carbon Assessments.* Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.london.gov.uk/sites/default/files/lpg_-_wlca_guidance.pdf
30. Ministero italiano. (2015). *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici - Allegato 1.* Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi_allegato1.pdf
31. Ministry of the interior and housing. (2021). *National strategy for sustainable construction.* The Danish Housing and Planning Authority. Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://im.dk/Media/637602217765946554/National_Strategy_for_Sustainable_Construktion.pdf
32. M. Kazemian, B. Shafei (2023). *Carbon sequestration and storage in concrete: A state-of-the-art review of compositions, methods, and developments.* Elsevier Ltd. Disponibile al sito: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102443>
33. Presidenza del Consiglio dei ministri. (2022). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).* Disponibile al sito: <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>
34. Programme for energy efficiency in buildings (PEEB). (2022). *Embodied Carbon- A hidden heavyweight for the climate.* Agence Française de Développement . Disponibile al sito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.peeb.build/imglib/downloads/PEEB_Building_Materials_Embodied_Carbon.pdf
35. Ramboll, KU Leuven. (2022). *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings_ Review of existing national legislative measures.* Disponibile al sito: <https://c.ramboll.com/reducing-whole-life-carbon>
36. Royal Institute of British Architects (RIBA). (2019). *Embodied and Whole Life Carbon assessment for architects.* Gesine Kippenberg . Disponibile al sito: <https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/whole-life-carbon-assessment-for-architects>
37. South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD). (2023). *SCAB Off-road mobile source emission factors.* Disponibile al sito: <https://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/ceqa/air-quality-analysis-handbook/off-road-mobile-source-emission-factors>

- 38.State of green. (2022). *White papers for a green transition: Energy renovation of buildings*. The Danish Energy Agency .Disponibile al sito: <https://stateofgreen.com/en/publications/energy-renovation-of-buildings/>
- 38.The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). (2022). *TM 54: 2022 Evaluating operational energy use at the design stage*.
- 39.The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). (2021). *TM 65: 2021 Embodied carbon in building services: A calculation methodology*.
- 40.The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). (2020). *TM 64: 2020 Operational performance: Indoor air quality*.
- 41.The Institution of Structural Engineers (ISTRUCTE). (2022). *How to calculate embodied carbon*. IStructE Ltd . Disponibile al sito: <https://www.istructe.org/resources/guidance/how-to-calculate-embodied-carbon/>
- 42.The Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (2017). *Whole life carbon assessment for the built environment-First Edition*. RICS. Disponibile al sito: <https://www.rics.org/profession-standards/rics-standards-and-guidance/sector-standards/construction-standards/whole-life-carbon-assessment>
- 43.The Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (2023). *Whole life carbon assessment for the built environment-Second Edition*. RICS. Disponibile al sito: <https://www.rics.org/profession-standards/rics-standards-and-guidance/sector-standards/construction-standards/whole-life-carbon-assessment>
- 44.UN Environment Programme (UNEP). (2023). *UNEP – your partner for people and planet*. Disponibile al sito: <https://www.unep.org/resources/publication/unep-your-partner-people-and-planet>
- 45.UN environment programme, Global Alliance for Buildings and Construction. (2023). *Building materials and the climate: constructing a new future*. Disponibile al sito: <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>
- 46.UNI-Ente Italiano di Normazione. (1981). *UNI 8290-1:1981 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia*.
- 47.UNI-Ente Italiano di Normazione. (2011). *UNI EN 15978:2011 Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo*.
- 48.UNI-Ente Italiano di Normazione. (2013). *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)*.
- 49.UNI-Ente Italiano di Normazione. (2014). *UNI EN 16449:2014 Legno e prodotti a base di*

legno - Calcolo del contenuto di carbonio di origine non fossile del legno e conversione in anidride carbonica.

50. UNI-Ente Italiano di Normazione. (2021a). *UNI EN 15193:2021 Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione.*
51. UNI-Ente Italiano di Normazione. (2021b). *UNI EN 15643:2021 Sostenibilità delle costruzioni - Quadro di riferimento per la valutazione degli edifici e delle opere di ingegneria civile.*
52. UNI-Ente Italiano di Normazione. (2021c). *UNI EN 15804:2021 Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto.*
53. United Kingdom Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2023). *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>
54. U.S. Department of energy. (2022). *Well to Wheels: Emissions from electric vehicles.* Disponibile al sito: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.html#:~:text=Well%2Dto%2Dwheel%20emissions%20include,and%20burning%20it%20in%20vehicles.
55. V. Corrado (Politecnico di Torino). *Calcolo dei parametri termici dinamici dei componenti edilizi secondo la norma ISO/DIS 13786:2008.*
56. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2020). *The building system carbon framework.* Gesine Kippenberg. Disponibile al sito: <https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/whole-life-carbon-assessment-for-architects>
57. World Green Building Council (World GBC). (2019). *Bringing embodied carbon upfront.* World GBC. Disponibile al sito: <https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/>