



**Politecnico  
di Torino**

Collegio di Architettura e Design  
Laurea Magistrale in  
Architettura per la Sostenibilità

VALUTAZIONE WHOLE LIFE CARBON PER LA  
TRANSIZIONE ECOLOGICA DEGLI EDIFICI.  
*Applicazione all'edificio CRIF21 di Bologna e  
approfondimento metodologico  
dell'Embodied Carbon degli impianti.*

Relatore:

*Roberto Giordano*

Correlatori:

*Benedetta Quaglio*

*Federica Gallina*

*Jacopo Andreotti*

Candidata:

*Carola Amongero*

Anno Accademico 2024/2025

# ABSTRACT

Il cambiamento climatico rappresenta una delle problematiche più urgenti del XXI secolo. Il settore delle costruzioni è uno dei principali responsabili delle emissioni di gas climalteranti; la crescente urbanizzazione, sommata all'aumento della domanda abitativa, contribuisce ad aggravare la crisi climatica.

Il lavoro di tesi si inserisce nel contesto della nuova *Direttiva sull'efficienza energetica degli edifici EPBD* (UE 2024/1275) e si propone di implementare alcuni strumenti di supporto al progettista per la quantificazione dei rilasci di carbonio dei manufatti edilizi nel corso del loro ciclo di vita. Tali strumenti faciliterebbero il processo di transizione verso la realizzazione di edifici a basse emissioni, allineandosi agli obiettivi dell'*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite* (ONU, 2015) e alle strategie delineate nel *Green Deal europeo* (Commissione Europea, 2019).

In questo senso, applicando un approccio metodologico di valutazione della WLC elaborato per il territorio italiano (Andreotti & Giordano, 2024), la tesi si concentra sulla contabilizzazione dell'Embodied Carbon (EC) e dell'Operational Carbon (OC) del caso di studio CRIF21, progettato dalla società Politecnica. Nella tesi è stata posta particolare attenzione alla componente EC degli impianti presenti negli edifici (MEP): sono stati sviluppati modelli di calcolo per la stima dell'EC in fase di progettazione preliminare per i sistemi fotovoltaici, per i sistemi solari e per gli ascensori. Il caso di studio è stato utilizzato per:

- validare gli assunti metodologici sviluppati nell'ambito del progetto europeo *BuildingLife*, dal Politecnico di Torino e dal Green Building Council Italia (Andreotti & Giordano, 2024);
- approfondire il contributo dell'EC generato dagli impianti applicando per la prima volta ad un caso di studio i modelli di calcolo sviluppati.

I risultati della ricerca hanno evidenziato che uno dei limiti della valutazione WLC risulta essere la carenza di dati relativi alle emissioni di cui sono responsabili i materiali/prodotti da costruzione e i macchinari impiegati nei cantieri. È quindi essenziale incrementare studi LCA e favorire la raccolta e la condivisione di dati affidabili.

Nella realizzazione di un edificio, la fase di progettazione preliminare rappresenta il momento in cui è possibile intervenire in modo più significativo nella riduzione delle emissioni di gas climalteranti. Risulta pertanto fondamentale sviluppare strumenti in grado di supportare la stima delle emissioni associate al ciclo di vita di un edificio.

A partire dagli strumenti presentati nel lavoro di tesi, si auspica un loro perfezionamento ed incremento, nonché un utilizzo sistematico nella pratica progettuale.

Climate change represents one of the most pressing challenges of the 21st century. The construction sector is among the main contributors to greenhouse gas emissions; growing urbanization, combined with increasing housing demand, continues to exacerbate the climate crisis.

This thesis is framed within the context of the new Energy Performance of Buildings Directive (EPBD – EU 2024/1275) and aims to implement several tools to support designers in quantifying the carbon emissions of building components throughout their life cycle. These tools would facilitate the transition towards the construction of low-emission buildings, aligning with the goals of the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development (UN, 2015) and the strategies outlined in the European Green Deal (European Commission, 2019).

In this regard, applying a methodological approach for Whole Life Carbon (WLC) assessment developed for the Italian context (Andreotti & Giordano, 2024), the thesis focuses on the accounting of Embodied Carbon (EC) and Operational Carbon (OC) of the case study CRIF21, designed by the engineering firm Politecnica. Special attention was given to the EC component of building services (MEP systems): calculation models were developed to estimate EC during the early design stage for photovoltaic systems, solar thermal systems, and elevators. The case study was used to:

- validate the methodological assumptions developed within the European project *BuildingLife*, coordinated by Politecnico di Torino and the Green Building Council Italia (Andreotti & Giordano, 2024);
- investigate the contribution of EC from MEP systems, by applying for the first time the newly developed calculation models to a real-world case.

The research findings highlighted that one of the main limitations in WLC assessment is the lack of data regarding emissions associated with construction materials/products and machinery used on site. It is therefore essential to enhance Life Cycle Assessment (LCA) studies and promote the collection and sharing of reliable data. In the construction of a building, the preliminary design phase represents the moment when the greatest potential exists to reduce greenhouse gas emissions. It is thus crucial to develop tools that can support the estimation of emissions associated with a building's life cycle. Starting from the tools presented in this thesis, further refinement and expansion are recommended, as well as their systematic integration into design practice.



# SOMMARIO

**1.INTRODUZIONE** .....1-6

1.1 Obiettivi della ricerca .....4

1.2 Struttura della ricerca .....4

**2.GLOSSARIO E DEFINIZIONI UTILI** .....7-14

## PARTE I

**3. WHOLE LIFE CARBON (WLC)** .....15-42

3.1 Definizione .....16

3.2 Dalla Life Cycle Assesment (LCA) alla Whole Life Carbon (WLC) .....17

3.3 Strategie, normative e strumenti europei per la regolamentazione della WLC nel settore delle costruzioni .....18

3.4 Il contesto italiano .....30

## PARTE II

**4. L'EMBODIED CARBON DEGLI IMPIANTI** .....33-61

4.1 Definizione di Mechanical Electrical and Plumbing(MEP) .....33

4.2 Il contributo dei MEP al cambiamento climatico .....33

4.3 Metodologia di calcolo dell'Embodied Carbon (EC) dei MEP .....36

4.4 Contabilizzazione EC dei MEP per la produzione di energia rinnovabile .....38

4.4.1 I sistemi fotovoltaici .....38

4.4.2 I sistemi solari termici.....40

4.5 Contabilizzazione EC dei MEP per il trasporto di persone e merci .....55

4.5.1 Ascensori .....55

## PARTE III

**5. IL CASO DI STUDIO: Nuovo centro direzionale "CRIF21" a Bologna** .....63-125

5.1 Descrizione .....64

5.2 Valutazione WLC .....65

5.2.1 Confini del sistema.....68

5.2.2 Embodied Carbon (EC) .....73

5.2.3 Operational Carbon (OC) .....107

5.2.4 Risultati e discussioni .....114

**6. CONCLUSIONI** .....127-130

**7. APPENDICE:** Analisi statistica .....131-138

**8. ALLEGATI** .....139-151

8.1 Documentazione di progetto .....140

8.2 Modelli di calcolo .....151

**9. BIBLIOGRAFIA** .....152-159

# INDICE

## FIGURE

Figura 1 - Fasi del ciclo di vita di un edificio (Elaborazione dell'Autore su fonte UNI EN 15978:2011) .....17

Figura 2 - Prossime tappe verso una politica europea sulla WLC (fonte: Ramboll & KU Leuven, 2023) .....27

Figura 3 - Panoramica della regolamentazione e delle iniziative sulla WLC in Europa, basata su: Steinmann et al. 2022, Balouktsi, Francart & Kanafani 2024, BPIE (Elaborazione dell'Autore su fonte Ramboll & KU Leuven, 2023) .....29

Figura 4 -Quadro sinottico del metodo di calcolo BASE: modalità “dati medi generici” (Andreotti & Giordano, 2024, p. 140) .....37

Figura 5 -Quadro sinottico del metodo di calcolo BASE: modalità “Key materials” (Andreotti & Giordano, 2024, p. 140).....37

Figura 6 - Monitoraggio dei risultati della COP28: triplicare l'energia rinnovabile entro il 2030 (Elaborazione dell'autrice su fonte International Renewable Energy Agency, 2024). .....39

Figura 7 - Analisi statistica per comprendere la relazione tra Peso e Area dei pannelli .....51

Figura 8 - Nuova sede CRIF, Via della Beverara 21/23 .....64

Figura 9 -Analisi della distribuzione delle variabili .....134

## GRAFICI

Grafico 1 - Emissioni del ciclo di vita di un pannello PV Mono-Si di 1 m², di un pannello PV Poli-Si di 1 m² e di un pannello PV CdTe di 1 m².....49

Grafico 2 - EC A1-A3 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290 .....76

Grafico 3 - EC A1-A3 per categorie di materiale .....78

Grafico 4 - EC A4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290. ...80

Grafico 5 - EC A4 per categorie di materiale .....82

Grafico 6 - EC A5 per tipologia di macchinario .....86

Grafico 7 - EC A5w per tipologia di macchinario .....87

Grafico 8 - EC A5w per categorie di materiale.....89

Grafico 9 - EC B4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290 ...93

Grafico 10 - EC B4 per categorie di materiale .....95

Grafico 11 - EC C2 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290...97

Grafico 12 - EC C2 per categorie di materiale .....99

Grafico 13 - EC C3-C4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290 .....101

Grafico 14 - EC C3-C4 per categorie di materiale .....103

Grafico 15 - Distribuzione dell'OC B6<sub>sv</sub> fra gli anni dello STR .....111

Grafico 16 - Confronto fra le emissioni di CO<sub>2</sub>eq prodotte nello STR in uno scenario fisso e in uno variabile .....112

Grafico 17 - incidenza delle emissioni OC B7 relative alle acque bianche (B) e di quelle relative alle acque grigie e nere (NG) .....113

Grafico 18 - Peso relativo delle componenti "Edificio (Opere civili)", "Impianti meccanici", "Pannelli fotovoltaici (PV)" e "Ascensori" rispetto all' EC totale .....116

Grafico 19 - Incidenza delle fasi e dei relativi moduli nella WLC dell'edificio CRIF21 .....117

Grafico 20 - Distribuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq tra gli anni dello scenario temporale di riferimento dell'edificio CRIF21 (STR=50 anni) .....120

Grafico 22 - Posizionamento dell'edificio CRIF21 nella scala di valutazione LETI.....125

Grafico 23 - Intervallo di prestazioni basato su progetti di riferimento (fonte: LETI, 2021) .....125

Grafico 24 - Confronto tra i valori stimati e i valori veri .....137

Grafico 25 - Plot dei residui .....138

Grafico 26 - Q-Q Plot .....138

## TABELLE

Tabella 1 - Quadro sinottico delle principali strategie, normative e degli strumenti per la regolamentazione della WLC nel settore delle costruzioni in Europa .....19

Tabella 2 - Panoramica delle caratteristiche principali dei modelli di politica nazionale (fonte: Ramboll & KU Leuven, 2022).....24

Tabella 3 - Casi studio e relative fonti del Modello A - PV Si .....44

Tabella 4 - LCI del Modello A - PV Si.....44

Tabella 5 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del Modello A - PV Si .....45

Tabella 6 - Casi studio e relative fonti del Modello B - PV-CdTe.....46

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 7 - LCI del Modello B - PV-CdTe .....                                                                                                                                                                                                                 | 46 |
| Tabella 8 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali<br>del Modello B - PV-CdTe .....                                                                                                                                                                | 46 |
| Tabella 9 - Calcolo WLC del modello tipo di pannello PV Mono-Si .....                                                                                                                                                                                         | 48 |
| Tabella 10 - Calcolo WLC del modello tipo di pannello PV CdTe .....                                                                                                                                                                                           | 49 |
| Tabella 11 - Valori di CO <sub>2</sub> eq per Pannelli solari al Silicio cristallino e a<br>film sottile stimati nella tesi e osservati per il territorio finlandese .....                                                                                    | 49 |
| Tabella 12 - Casi studio e relative fonti del modello di CST .....                                                                                                                                                                                            | 52 |
| Tabella 13 - LCI del modello di CST .....                                                                                                                                                                                                                     | 52 |
| Tabella 14 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del modello<br>di CST .....                                                                                                                                                                    | 53 |
| Tabella 15 - LCI del modello di CST .....                                                                                                                                                                                                                     | 54 |
| Tabella 16 - Casi studio, relative fonti e ambito di applicazione utilizzati<br>per il modello tipo di ascensore .....                                                                                                                                        | 58 |
| Tabella 17 - LCI del modello tipo di ascensore .....                                                                                                                                                                                                          | 59 |
| Tabella 18 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del modello<br>tipo di ascensore .....                                                                                                                                                         | 59 |
| Tabella 19 - Calcolo WLC del modello tipo di ascensore per un peso di<br>4.396,9 kg .....                                                                                                                                                                     | 61 |
| Tabella 20 - Moduli contabilizzati nel calcolo per l'edificio "CRIF21" in<br>relazione alle indicazioni del progetto INDICATE LIFE .....                                                                                                                      | 70 |
| Tabella 21 - Elementi contabilizzati nel calcolo per l'edificio "CRIF21" in<br>relazione alle indicazioni del progetto INDICATE LIFE .....                                                                                                                    | 71 |
| Tabella 22 - Percentuale di eccedenze e sfrido per categoria di<br>materiale/elemento (fonte: Andreotti & Giordano, 2024, pp. 50-51) ..                                                                                                                       | 74 |
| Tabella 23 - Definizione del Coefficiente di emissione specifica in<br>kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> per l'elemento "parete interna autoportante con doppio<br>rivestimento in cartongesso e doppia struttura parallela collegata,<br>coibentata" ..... | 75 |
| Tabella 24 - EC A1-A3 per unità tecnologiche in accordo<br>con UNI:8290 .....                                                                                                                                                                                 | 76 |
| Tabella 25 - EC A1-A3 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                                                           | 76 |
| Tabella 26 - EC A1-A3 per categorie di materiale .....                                                                                                                                                                                                        | 77 |
| Tabella 27 - EC A4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290 ..                                                                                                                                                                                          | 80 |
| Tabella 28 - EC A4 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                                                              | 80 |
| Tabella 29 - EC A4 per categorie di materiale .....                                                                                                                                                                                                           | 81 |
| Tabella 30 - Macchinari e relative produzioni orarie per tipologia di                                                                                                                                                                                         |    |

|                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| cantiere o altezza edificio .....                                                                                                                                                                                  | 84  |
| Tabella 31 - EC A5 per tipologia di macchinario in accordo con "SCAB<br>Fleet Average Emission Factors (Diesel), 2025" (South Coast AQMD,<br>2024) .....                                                           | 85  |
| Tabella 32 - EC A5 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                   | 86  |
| Tabella 34 - EC A5w per unità tecnologiche in accordo<br>con UNI:8290 .....                                                                                                                                        | 87  |
| Tabella 33 - EC A5w per unità di superficie .....                                                                                                                                                                  | 87  |
| Tabella 35 - EC A5w per categorie di materiale .....                                                                                                                                                               | 88  |
| Tabella 36 - EC B4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290 ..                                                                                                                                               | 93  |
| Tabella 37 - EC B4 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                   | 93  |
| Tabella 38 - EC B4 per categorie di materiale .....                                                                                                                                                                | 94  |
| Tabella 39 - EC C2 per unità tecnologiche in accordo<br>con UNI:8290 .....                                                                                                                                         | 97  |
| Tabella 40 - EC C2 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                   | 97  |
| Tabella 41 - EC C2 per categorie di materiale .....                                                                                                                                                                | 98  |
| Tabella 42 - EC C3-C4 per unità tecnologiche in accordo<br>con UNI:8290 .....                                                                                                                                      | 101 |
| Tabella 43 - EC C3-C4 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                | 101 |
| Tabella 44 - EC C3-C4 per categorie di materiale .....                                                                                                                                                             | 102 |
| Tabella 45 - LCI del modello tipo di UTA .....                                                                                                                                                                     | 104 |
| Tabella 46 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali per il<br>modello tipo di UTA .....                                                                                                                 | 105 |
| Tabella 47 - WLC dei sistemi UTA presenti nell'edificio CRIF21 per una<br>vita utile di 25 anni .....                                                                                                              | 105 |
| Tabella 48 - EC dei sistemi di ascensori presenti nell'edificio CRIF21 per<br>una vita utile di 30 anni .....                                                                                                      | 106 |
| Tabella 49 - EC dei sistemi di ascensore presenti nell'edificio<br>CRIF21 .....                                                                                                                                    | 107 |
| Tabella 50 - OC B6 con scenario variabile (in accordo con Andreotti &<br>Giordano, 2024, p. 101) .....                                                                                                             | 110 |
| Tabella 51 - OC B6 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                   | 111 |
| Tabella 52 - OC B7 .....                                                                                                                                                                                           | 113 |
| Tabella 53 - OC B7 per unità di superficie .....                                                                                                                                                                   | 113 |
| Tabella 54 - Sintesi delle emissioni di cui è responsabile l'edificio<br>CRIF21 nello scenario "cradle to grave" (fonte: elaborazione dell'autore<br>su indicazioni Figura 1.3 (Andreotti & Giordano, 2024)) ..... | 115 |

Tabella 55 - Allocazione d'impatto degli impianti sulla base delle  
incidenze percentuali delle opere civili .....116

Tabella 56 - Emissioni di CO<sub>2</sub>eq per fasi .....117

Tabella 57 - Emissioni di CO<sub>2</sub>eq per unità di superficie .....118

Tabella 58 - Distribuzione delle emissioni di CO2eq tra gli anni dello  
scenario temporale di riferimento dell'edificio CRIF21  
(STR=50 anni) .....122

Tabella 59 - Dataset .....132

Tabella 60 - Output del modello .....135

EQUAZIONI

Equazione 1 - Conversione delle emissioni da 1m<sup>2</sup> di pannello PV-  
MonoSi a 1m<sup>2</sup> di pannello PV-PoliSi .....47

Equazione 2 - Relazione tra Peso (W), Travelled height (H), Related  
Load (R) e Floor number (F) di un ascensore .....59

Equazione 3 - Valutazione dell’Embodied Carbon per la fase di  
produzione A1-A3 (Andreotti & Giordano, 2024, p. 48).....73

Equazione 4 - Calcolo dell'OC B5 per lo scenario variabile .....109

Equazione 5 - Equazione per il calcolo dell’OCB7 (Andreotti & Giordano,  
2024, p.105) .....112

1. INTRODUZIONE

Tra le problematiche più complesse del nostro tempo, il cambiamento climatico occupa un posto di rilievo. La crescente urbanizzazione e l'aumento della domanda abitativa contribuiscono ad aggravare questa crisi: nel 2022, oltre il 75% della popolazione dell'Unione Europea (UE) risiedeva in aree urbane e si stima che entro il 2050 verrà superata la quota dell'80% (Commissione Europea, 2023). In questo scenario, diventa prioritario intervenire sulle emissioni climalteranti, di cui il settore delle costruzioni è uno dei principali responsabili. Secondo la Commissione Europea, gli edifici generano circa il 36% delle emissioni di gas a effetto serra e sono responsabili del 40% del consumo energetico complessivo nell'UE (COM221, 2022).

Il lavoro di tesi si inserisce nel contesto della nuova *Direttiva sull'efficienza energetica degli edifici EPBD* (UE 2024/1275) e si propone di implementare alcuni strumenti di supporto al progettista per la quantificazione dei rilasci di carbonio dei manufatti edilizi. Tali strumenti facilitano il processo di transizione verso edifici a basse emissioni e si allineano sia agli obiettivi dell'*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite* (ONU, 2015) sia alle strategie delineate nel Green Deal europeo (Commissione Europea, 2019). I primi enfatizzano l'importanza di azioni concrete per contrastare il cambiamento climatico e promuovere la sostenibilità ambientale, sociale ed economica mentre il secondo stabilisce l'ambizioso obiettivo di rendere l'Unione Europea il primo continente climaticamente neutro entro il 2050, attraverso interventi mirati in vari settori, tra cui quello dell'edilizia.

Fino ad oggi l'attenzione è stata rivolta principalmente alla componente Operational Carbon (OC), ossia alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq associate al fabbisogno energetico in fase d'Uso di un edificio (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, acqua calda sanitaria, ecc.). In questo senso, negli ultimi due decenni, si è assistito ad una forte spinta verso l'efficientamento energetico e l'uso di energie rinnovabili, grazie anche al principio *Energy Efficiency First* promosso dall'UE e recepito all'interno della *Direttiva EPBD* (UE 2024/1275).

Sebbene si siano ottenuti risultati significativi nella riduzione delle emissioni operative, sono poche le iniziative volte al contenimento delle emissioni legate ai materiali da costruzione, ai prodotti, agli elementi tecnici e ai processi di costruzione, manutenzione e demolizione (GlobalABC – UNEP, 2022). Queste emissioni, denominate Embodied Carbon (EC), costituiscono una quota sempre più rilevante dell'impronta carbonica complessiva di un edificio, soprattutto nel caso di edifici ad alta efficienza energetica. Infatti, con l'introduzione di normative sempre più stringenti sull'efficienza operativa, il peso relativo dell'EC è destinato ad aumentare.

Secondo il World Green Building Council, nel rapporto *Bringing Embodied Carbon Upfront* (WGBC, 2019), in assenza di azioni concrete, entro il 2050 il carbonio incorporato potrebbe arrivare a rappresentare fino al 50% dell'impronta carbonica totale di un edificio di nuova costruzione. Questa evoluzione negativa impone un cambiamento di paradigma nella valutazione dell'impatto ambientale del costruito, spostando l'attenzione da una visione limitata alla fase operativa ad un approccio più ampio, riferito all'intero ciclo di vita. In tal senso, la valutazione Whole Life Carbon (WLC) si configura come uno strumento indispensabile per la quantificazione delle emissioni complessive di gas climalteranti – espresse in anidride carbonica equivalente (CO<sub>2</sub>eq) – associate a un edificio, includendo sia l'OC che l'EC, lungo tutte le fasi che caratterizzano il processo edilizio: Produzione, Costruzione, Utilizzo e Fine Vita.

Appurata l'importanza della valutazione dell'EC relativa ai manufatti edilizi è opportuno prestare attenzione agli elementi che vengono presi in esame. Spesso, nella valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq di cui è responsabile un edificio non vengono tenuti in considerazione i rilasci EC dovuti ai sistemi meccanici, elettrici e idraulici. Questi impianti – conosciuti anche con il termine inglese di MEP (Mechanical Electrical and Plumbing) – sono in realtà responsabili di una porzione consistente di emissioni di carbonio incorporato. L'EC legato ai MEP può contribuire infatti dal 15% al 50% nell'EC negli edifici commerciali e fino al 50% nell'EC nelle ristrutturazioni (Ramachandran, 2024).

In questo senso, l'incidenza dei sistemi MEP è attribuibile principalmente a tre fattori:

- 1) Elevata frequenza di sostituzione - i componenti MEP, essendo essenziali per il funzionamento dell'edificio, richiedono cicli regolari di manutenzione e sostituzione durante il periodo di Uso del manufatto edilizio. Tali operazioni comportano anche emissioni dovute a operazioni di trasporto, installazione e smaltimento.
- 2) Uso di refrigeranti - alcuni sistemi MEP, in particolare quelli destinati alla climatizzazione, fanno uso di refrigeranti ad alto potenziale di riscaldamento globale (GWP), che incidono in modo significativo sul bilancio emissivo.
- 3) Sovradimensionamento impiantistico - spesso, i sistemi MEP vengono progettati con ampi margini di sicurezza, superiori alle reali necessità operative. Questo approccio comporta un impiego eccessivo di materiali, con conseguente aumento delle emissioni di carbonio incorporato legate alle fasi di produzione, trasporto e installazione degli impianti (Ramachandran, 2024).

La tesi intende confrontarsi con alcuni aspetti specifici connessi al contributo EC degli impianti a servizio dei manufatti edilizi, elaborando modelli di calcolo semplificati che supportino le scelte dei professionisti



in fase di progettazione preliminare. La modellazione si è concentrata sugli impianti per la produzione di energia rinnovabile (collettori solari termici e pannelli fotovoltaici) e su quelli per il trasporto di persone e merci (ascensori).

## 1.1 OBIETTIVI

Il lavoro di tesi, impiegando un approccio metodologico di valutazione della WLC elaborato per il territorio italiano (Andreotti & Giordano, 2024), si concentra sulla contabilizzazione dell'Embodied Carbon (EC) e dell'Operational Carbon (OC) di un caso di studio progettato dalla società Politecnica. L'edificio, commissionato dalla società Crif S.p.A. e destinato ad ospitare una nuova sede direzionale a Bologna, ha inoltre permesso di verificare gli assunti sperimentali connessi ai modelli di calcolo semplificati sviluppati per l'analisi dei sistemi MEP.

La ricerca, tenuto conto delle esigenze del progettista e delle caratteristiche del caso di studio, si è posta tre obiettivi:

- 1) Validare gli assunti metodologici sviluppati nell'ambito del progetto internazionale BuildingLife, dal Politecnico di Torino e dal Green Building Council Italia (Andreotti & Giordano, 2024);
- 2) Approfondire il contributo dell'EC generato dagli impianti presenti negli edifici;
- 3) Caratterizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq dell'opera e restituire i valori allo studio di progettazione, per consentire ragionamenti e considerazioni sull'impatto ambientale di cui è responsabile il loro edificio.

Si tiene a precisare che lo studio di progettazione ha collaborato attivamente al presente lavoro, fornendo la documentazione tecnica di progetto e il supporto nell'elaborazione dei dati.

## 1.2 STRUTTURA DELLA RICERCA

Il documento si apre con un glossario tematico, che raccoglie i principali acronimi e alcune definizioni utili per una chiara comprensione del testo.

La trattazione è articolata in tre parti:

La prima parte del lavoro è dedicata a fornire un inquadramento generale sul tema della Whole Life Carbon (WLC). Una sezione introduttiva è volta a definire il concetto di WLC e a chiarirne il rapporto con l'approccio Life Cycle Assessment (LCA).

Successivamente, viene proposta una panoramica sulle principali normative, strategie e iniziative a livello europeo che stanno contribuendo all'integrazione della WLC nelle politiche per la decarbonizzazione del settore edilizio; in questa sezione viene anche presentato un quadro di confronto sulle diverse strategie adottate dalle Nazioni pioniere nel contesto della decarbonizzazione in Europa, in vista dello sviluppo di una politica UE. Il focus si sposta poi sul contesto nazionale, con l'analisi della Roadmap italiana per la decarbonizzazione dell'ambiente costruito e un approfondimento sulla pubblicazione tecnica di supporto *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della WLC e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio*, che propone il metodo applicativo per la valutazione della WLC di un edificio utilizzato nella tesi.

Nella seconda parte si introduce il tema degli impianti; dopo una sezione dedicata al loro impatto ambientale e alle misure che si possono adottare per ridurlo, è esposto il processo che ha portato alla definizione dei modelli per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq per i pannelli solari, per quelli fotovoltaici e per gli ascensori. Più precisamente, in questa parte sono presentati i casi di studio presi in considerazione (dataset) e l'iter che ha portato alla definizione dei modelli, gli step di calcolo applicati o da applicare per la quantificazione delle emissioni di gas climalteranti e le eventuali assunzioni adottate nel processo.

La terza parte è dedicata al caso di studio e presenta una breve descrizione del progetto e dello studio di progettazione Politecnica, per poi passare alla valutazione del ciclo di vita dell'edificio (Whole Life Carbon, WLC). Nella sezione dedicata alla valutazione viene introdotto inizialmente un approfondimento esplicativo, finalizzato a fornire tutti gli elementi necessari per comprendere in modo chiaro il processo di calcolo adottato e i risultati ottenuti (Cut-off rules, Functional Unit, Scenario temporale di riferimento, Confini del sistema,...). Segue l'esposizione della valutazione WLC articolata per fasi e moduli, nella quale vengono affrontati separatamente la componente delle emissioni incorporate (Embodied Carbon, EC) e quella legata alle emissioni operative (Operational Carbon, OC). Per ciascuna fase vengono presentati i calcoli da effettuare secondo la pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024), le assunzioni specifiche adottate per il caso studio e una breve analisi critica dei risultati parziali. Come ultima sezione, viene proposta una panoramica complessiva dei risultati legati all'intera valutazione WLC dell'edificio.

Il lavoro di tesi si conclude con una sezione dedicata alle considerazioni emerse: in questa sezione si illustrano le possibili prospettive di

implementazione dei modelli di calcolo presentati nel documento e le possibili ricadute del lavoro di tesi sul progettista, evidenziando le criticità e i benefici degli attuali strumenti di calcolo.

## **2. GLOSSARIO E DEFINIZIONI UTILI**

| Termine                                 | Acronimo | Definizione                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contesto generale                       |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Bill-of-Quantities                      | BoQ      | Indica la quantità di materiali/prodotti che vengono conferiti in cantiere. Questa categoria comprende sia i materiali e prodotti effettivamente utilizzati per la costruzione dell'edificio, sia una quota relativa a sfridi da costruzione ed eccedenze.                                 |
| Carbonio incorporato (Embodied Carbon)  | EC       | È l'indicatore utilizzato per valutare le emissioni di gas climalteranti generate, assorbite, rimosse o compensate dai materiali da costruzione durante l'intero ciclo di vita di un edificio. È espresso in chilogrammi o tonnellate di CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> eq). |
| Carbonio operativo (Operational Carbon) | OC       | È l'indicatore utilizzato per valutare le emissioni di gas climalteranti generate per il funzionamento di un edificio. È espresso in chilogrammi o tonnellate di CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> eq).                                                                         |
| Confini di sistema (System boundary)    | -        | Nell'ambito della valutazione del ciclo di vita (LCA) rappresentano l'insieme dei criteri che determinano quali processi unitari sono inclusi o esclusi dallo studio. (UNI EN ISO 14044:2006/Amd.2:2020)                                                                                   |
| Cut-off Rules                           | -        | Sono i criteri di esclusione utilizzati per determinare quali flussi di materiale, processi e impatti ambientali sono omessi dallo studio del ciclo di vita (LCA).                                                                                                                         |
| Dati generici (Generic data)            | -        | Sono dati che rappresentano processi standardizzati medi, nel contesto WLC sono riferiti a materiali e prodotti da costruzione.                                                                                                                                                            |

|                                                                         |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dati specifici (Specific data)                                          | -   | Sono informazioni relative a uno specifico prodotto o processo, raccolte direttamente presso un determinato produttore, in una precisa localizzazione geografica e in un periodo temporale definito. Questi dati sono documentati in report tecnici (come le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto - EPD) e talvolta resi disponibili dai produttori in banche dati.                 |
| Design-as- Built                                                        | DaB | Indica la quantità di materiali/prodotti che compongono l'edificio in base a quanto stabilito dagli elaborati di progetto. Questa categoria comprende solo i materiali e prodotti effettivamente utilizzati per la costruzione dell'edificio, escludendo sia la quota relativa agli sfridi da costruzione che quella relativa alle eccedenze.                                       |
| Dichiarazione Ambientale di Prodotto (Enviromental Product Declaration) | EPD | Definita anche Dichiarazione ambientale di Tipo III, è un documento standardizzato e verificato che descrive gli impatti ambientali di un determinato prodotto o servizio lungo una o più fasi del suo ciclo di vita. La dichiarazione è condotta in riferimento a norme internazionali (ISO 14040:2006 e ISO 14025:2006) garantendo così informazioni trasparenti e confrontabili. |
| Energia operativa (Operational Energy)                                  | OE  | È l'indicatore utilizzato per valutare le risorse energetiche primarie necessarie per il funzionamento di un edificio durante il suo periodo di attività. È espresso in kWh o in MJ.                                                                                                                                                                                                |

|                                                   |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fasi                                              | -   | <p>Sono gli intervalli temporali che compongono il ciclo di vita di un edificio o di un prodotto, per cui vengono quantificati gli impatti ambientali (LCA) e le emissioni di gas effetto serra (WLC).</p> <p>Le fasi sono quattro:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Produzione (A)</li><li>- Costruzione (A)</li><li>- Uso (B)</li><li>- Fine vita (C)</li></ul> <p>A queste fasi si aggiunge un quinto intervallo, Oltre il ciclo di vita (D).</p> |
| Fattori di emissioni specifica                    | -   | <p>Anche definiti fattori di conversione, intensità di emissione o intensità di carbonio, vengono utilizzati per determinare il quantitativo di emissioni climalteranti prodotte da una determinata attività o processo.</p> <p>Vengono utilizzati per rendere comparabile l'impatto di diversi gas a effetto serra.</p>                                                                                                                                        |
| Key materials                                     | -   | <p>Sono i materiali principali che costituiscono un determinato prodotto o edificio.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment) | LCA | <p>È una metodologia standardizzata che valuta gli impatti ambientali relativi a tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, processo o servizio.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Manufatto edilizio                                | -   | <p>È un elemento costruito che può avere carattere permanente o temporaneo e può svolgere una funzione strutturale, architettonica, impiantistica o infrastrutturale.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|        |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Moduli | - | <p>Sono gli intervalli temporali specifici che costituiscono le fasi del ciclo di vita di un edificio.</p> <p>I moduli che costituiscono le fasi dalla A alla C sono:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• A1 – Estrazione e lavorazione delle materie prime</li><li>• A2 – Trasporto delle materie prime ai siti di produzione</li><li>• A3 – Produzione dei materiali da costruzione (in fabbrica)</li><li>• A4 – Trasporto dei prodotti da costruzione al cantiere</li><li>• A5 – Processi di costruzione/ installazione nel sito (inclusi sfridi e rifiuti)</li><li>• B1 – Uso dell'edificio (funzionamento diretto e impatti non energetici)</li><li>• B2 – Manutenzione ordinaria e straordinaria</li><li>• B3 – Riparazione di componenti e impianti</li><li>• B4 – Sostituzione di componenti e impianti</li><li>• B5 – Riqualificazione/rinnovamento parziale dell'edificio</li><li>• B6 – Consumo energetico operativo</li><li>• B7 – Consumo di acqua durante l'uso</li><li>• C1 – Demolizione dell'edificio</li><li>• C2 – Trasporto dei materiali di risulta agli impianti di trattamento</li><li>• C3 – Trattamento dei rifiuti per recupero o smaltimento</li><li>• C4 – Smaltimento finale in discarica o incenerimento senza recupero</li></ul> |
|--------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential) | GWP | È un indicatore che quantifica quanto un gas a effetto serra contribuisce al cambiamento climatico rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica (CO <sub>2</sub> ). Per rendere confrontabili tra loro gas diversi, ciascun gas viene convertito in chilogrammi o tonnellate di CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> eq) utilizzando fattori di caratterizzazione, che ne esprimono l'effetto climalterante su un orizzonte temporale standard di 100 anni.    |
| Scenario temporale di riferimento                              | STR | È il periodo temporale in cui si prevede che un determinato prodotto o manufatto edilizio sarà in grado di svolgere le funzioni per le quali è stato progettato. Viene preso in considerazione per l'analisi del ciclo di vita.                                                                                                                                                                                                                                               |
| Unità funzionale (Functional Unit)                             | FU  | In accordo con la norma UNI EN ISO 14040:2021 è "La performance quantificata di un sistema produttivo utilizzata come unità di riferimento".                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Whole Life Carbon                                              | WLC | È la quantificazione complessiva delle emissioni e rimozioni di gas climalteranti, espresse in CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> eq), di cui è responsabile un edificio durante l'intero ciclo di vita.<br>Include sia il carbonio incorporato (Embodied Carbon - EC), legato alla Produzione, Costruzione, Manutenzione e Fine Vita dei materiali, sia il carbonio operativo (Operational Carbon - OC), ossia le emissioni dovute al funzionamento dell'edificio. |
| Sistemi e servizi MEP                                          |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Bilanciamento del sistema (Balance of System)                  | BOS | Nel contesto degli impianti fotovoltaici (PV) sono tutti i componenti necessari per il corretto funzionamento dell'impianto, ad esclusione dei moduli fotovoltaici.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                      |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tellururo di cadmio (Cadmium Telluride)                                                              | CdTe    | È un materiale semiconduttore composto da cadmio e tellurio, ampiamente utilizzato nelle tecnologie di celle solari a film sottile.                                                                                                                                                                                                                   |
| Collettore solare termico (Concentrated Solar Thermal)                                               | CST     | È un dispositivo progettato per catturare l'energia solare e convertirla in calore, che viene poi utilizzato per riscaldare un fluido (solitamente acqua o un fluido termovettore). Questa tipologia di dispositivo è spesso impiegata negli edifici per il riscaldamento dell'ambiente.                                                              |
| Riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) | HVAC    | Indica l'insieme di sistemi e tecnologie progettati per il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria negli ambienti interni. Questi sistemi sono fondamentali per garantire il controllo e il mantenimento del comfort termigrometrico, nonché per assicurare una qualità dell'aria adeguata e salubre all'interno degli edifici. |
| Impianti Meccanici, Elettrici e Idraulici (Mechanical, Electrical and Plumbing)                      | MEP     | Comprendono l'insieme dei sistemi meccanici, elettrici e idraulici che garantiscono il funzionamento, il comfort e la sicurezza degli edifici, comprendendo impianti di riscaldamento, ventilazione, condizionamento, distribuzione elettrica, illuminazione, e reti idriche e fognarie.                                                              |
| Silicio monocristallino (Monocrystalline Silicon)                                                    | Mono-Si | È un materiale semiconduttore costituito da un unico cristallo continuo di silicio che viene comunemente utilizzato nella fabbricazione di celle solari ad alta efficienza.                                                                                                                                                                           |
| Silicio policristallino (Polycrystalline Silicon)                                                    | Poli-Si | È un materiale semiconduttore composto da un insieme di piccoli cristalli di silicio fusi tra loro ma con orientamenti differenti.<br>È ampiamente utilizzato nella produzione di celle solari.                                                                                                                                                       |
| Fotovoltaico (Photovoltaic)                                                                          | PV      | Tecnologia che converte la luce solare direttamente in energia elettrica attraverso l'uso di celle solari.                                                                                                                                                                                                                                            |



|                                                          |     |                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Regole di Categoria di Prodotto (Product Category Rules) | PCR | Sono regole, requisiti e linee guida specifici necessari per condurre una valutazione del ciclo di vita (LCA) al fine di redigere una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD). |
|----------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

# PARTE I

## 3. WHOLE LIFE CARBON

La Whole Life Carbon (WLC), intesa come una valutazione di tutte le emissioni e rimozioni di gas climalteranti afferenti al ciclo di vita di un manufatto edilizio, si pone in linea con gli obiettivi globali di mitigazione dei cambiamenti climatici, stabiliti a livello internazionale nell’ambito della COP21 (Conference of the Parties), tenutasi a Parigi nel 2015. Durante questa conferenza centonovantasei Paesi hanno sottoscritto l’Accordo di Parigi (United Nation, 2015), un patto - diventando giuridicamente vincolante nel 2016, con il raggiungimento della soglia minima di ratifica - che mira a limitare l’aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, puntando a contenerlo entro 1,5°C. Per raggiungere tali traguardi, è fondamentale affrontare in modo sistematico le emissioni di CO<sub>2</sub> in tutti i settori, compreso quello edilizio che, come evidenziato dalla Commissione Europea, è tra i più impattanti a livello globale (COM221, 2022).

In questo contesto, la valutazione WLC assume un ruolo strategico, in quanto consente ai progettisti, ai decisori politici e agli operatori del settore di orientare le scelte costruttive verso soluzioni a basse emissioni, contribuendo così alla decarbonizzazione del parco edilizio e al raggiungimento degli obiettivi climatici per il 2050 (UE, 2021/1119).

3.1 DEFINIZIONE

La valutazione Whole Life Carbon (WLC) si configura quale approccio integrato per la quantificazione delle emissioni e delle rimozioni di gas climalteranti (espresse in CO<sub>2</sub> equivalente) di cui è responsabile un edificio durante l’intero arco del suo ciclo di vita.

Tale valutazione considera due principali indicatori:

- l'Embodied Carbon (EC) - include le emissioni di gas climalteranti generate, assorbite, rimosse o compensate durante la produzione, il trasporto, l’assemblaggio, la manutenzione e lo smaltimento dei materiali da costruzione (moduli A1–A5, B1–B5, C1–C4). È espresso in chilogrammi o tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq);
- l'Operational Carbon (OC) - include le emissioni di gas climalteranti generate per il funzionamento di un edificio (moduli B6–B7). È espresso in chilogrammi o tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq).

3.2 DALLA LIFE CYCLE ASSESSMENT ALLA WHOLE LIFE CARBON

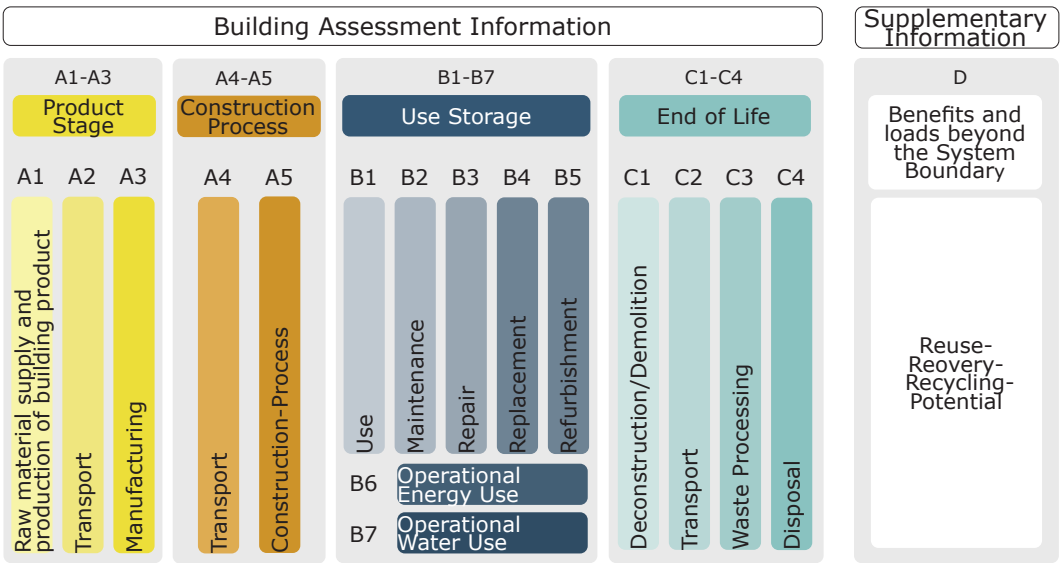
Alla base della Whole Life Carbon (WLC) vi è la Life Cycle Assessment (LCA), una metodologia riconosciuta e standardizzata a livello internazionale (UNI EN ISO 14040:2021; UNI EN ISO 14044:2021) che consente di valutare in modo sistematico gli impatti ambientali associati a tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, di un servizio o di un sistema. In ambito edilizio, l'LCA viene utilizzata per valutare materiali, prodotti, processi e, per estensione, manufatti edilizi secondo un set di categorie di impatto ambientale definite a livello normativo (Potenziale di riscaldamento globale, Potenziale di autofizzazione, Potenziale di acidificazione, ecc).

In riferimento alla norma UNI EN 15978 (CEN, 2011) – come schematizzato nella *Figura 1* – l’analisi ambientale del ciclo di vita di un edificio è strutturata in quattro fasi principali:

- Fase di Produzione (A1–A3): estrazione e lavorazione delle materie prime, produzione dei componenti e trasporto.
- Fase di Costruzione (A4–A5): trasporto in cantiere e attività di costruzione/messa in opera.
- Fase d’Uso (B1–B7): uso, manutenzione, riparazione, sostituzione, consumo di energia e acqua.
- Fase di Fine Vita (C1–C4): demolizione, trasporto, trattamento e smaltimento dei materiali.

A queste si aggiunge la fase D, che include i benefici e i carichi evitati derivanti dal potenziale riuso, recupero o riciclo dei materiali a fine vita.

Figura 1 - Fasi del ciclo di vita di un edificio (Elaborazione dell'Autore su fonte UNI EN 15978:2011)



La metodologia LCA si articola, secondo gli standard (UNI EN ISO 14040:2021; UNI EN ISO 14044:2021), in quattro fasi fondamentali:

1. definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (Goal and scope definition) - chiarisce lo scopo dell'analisi, l'unità funzionale di riferimento e i confini del sistema;
2. inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory, LCI) - prevede la raccolta e la quantificazione dei flussi in ingresso e in uscita del sistema;
3. valutazione degli impatti ambientali (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) - traduce i dati dell'inventario in potenziali categorie di impatto ambientale;
4. interpretazione dei risultati (Interpretation of results) - analizza le criticità e le potenzialità dei risultati ottenuti, a supporto delle decisioni progettuali o strategiche.

L'LCA, nell'ambito della progettazione di un manufatto edilizio, è uno strumento efficace per individuare i punti critici di un processo e valutarne soluzioni alternative o scenari migliorativi. Può guidare sia l'ottimizzazione di prodotti esistenti, sia la progettazione di nuovi manufatti a basso impatto (To Be, s.d.).

La WLC rappresenta un'applicazione specifica della LCA, focalizzata esclusivamente sulle emissioni climalteranti, espresse in CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq). Il passaggio dall'LCA alla WLC segna una specializzazione del metodo nella quantificazione delle emissioni e rimozioni di carbonio lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, rispondendo alla crescente necessità di mitigare il cambiamento climatico e ridurre l'impatto del settore edilizio in termini di gas serra.

### 3.3 STRATEGIE, NORMATIVE E STRUMENTI EUROPEI PER LA REGOLAMENTAZIONE DELLA WHOLE LIFE CARBON NEL SETTORE EDILIZIO.

Nel contesto europeo, la progressiva integrazione del concetto di Whole Life Carbon (WLC) nelle politiche edilizie è supportata da una direttiva e da una pluralità di strumenti tecnici e documenti strategici. Queste iniziative rappresentano un mosaico articolato di approcci e obiettivi che mirano a promuovere una visione sistemica delle emissioni climalteranti nel settore delle costruzioni, estendendo l'attenzione oltre la sola fase operativa degli edifici. La *Tabella 1* offre una sintesi dei principali strumenti e riferimenti normativi approfonditi nel paragrafo; per ognuno viene fornita una breve descrizione e ne viene indicata la categoria, la fonte e l'anno di pubblicazione.

Tabella 1 - Quadro sinottico delle principali strategie, normative e degli strumenti per la regolamentazione della WLC nel settore delle costruzioni in Europa

| Categoria                        | Titolo                                                  | Descrizione sintetica                                                                                                                                            | Fonte/Anno                                   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Quadro strategico                | European Green Deal                                     | Strategia europea per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Include obiettivi di decarbonizzazione del settore edilizio.                            | Commissione Europea, 2019                    |
|                                  | Fit for 55                                              | Pacchetto legislativo che mira a ridurre del 55% le emissioni entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Include misure relative alla WLC nel settore edilizio. | Commissione Europea, 2021                    |
| Direttiva                        | EPBD rifusa (Direttiva UE 2024/1275)                    | Introduce l'obbligo di calcolo del GWP lungo il ciclo di vita per i nuovi edifici, a partire dal 2028.                                                           | Unione Europea, 2024                         |
| Linee guida                      | Level(s)                                                | Framework metodologico volontario per la misurazione delle performance di sostenibilità degli edifici. Include indicatori legati alla WLC.                       | Commissione Europea, 2020                    |
| Norma tecnica europea            | UNI EN 15978:2011                                       | Fornisce un metodo per la valutazione delle prestazioni ambientale degli edifici lungo il ciclo di vita.                                                         | Comitato Europeo di Normazione, 2011         |
| Roadmap e policy paper           | EU Policy Whole Life Carbon Roadmap                     | Roadmap per l'integrazione della WLC nelle politiche europee.                                                                                                    | World Green Building Council, 2022           |
|                                  | How to Embed Whole Life Carbon in the EPBD              | Documento tecnico con raccomandazioni operative per integrare la WLC nella revisione della Direttiva EPBD.                                                       | Buildings Performance Institute Europe, 2022 |
| Progetti europei e studi tecnici | INDICATE LIFE                                           | Progetto del programma LIFE che sviluppa strumenti per la valutazione WLC a supporto delle politiche nazionali.                                                  | Unione Europea, 2023                         |
|                                  | Whole life carbon models for the EU27 (serie di report) | Due report che analizzano le politiche nazionali e propongono un modello multilivello per la regolazione del WLC a livello europeo.                              | Ramboll & KU Leuven, 2022-2023               |

## Direttiva EPBD sull'efficienza energetica degli edifici.

Negli ultimi anni la Whole Life Carbon ha assunto un ruolo sempre più rilevante nelle strategie europee per la decarbonizzazione del settore edilizio. Un passaggio fondamentale in questa direzione è stato la rifusione della *Direttiva EPBD sull'efficienza energetica degli edifici* (UE 2024/1275), approvata nell'ambito del *Green Deal Europeo* (Commissione Europea, 2019) e del pacchetto legislativo *Fit for 55* (Commissione Europea, 2021), che mira alla riduzione delle emissioni nette di gas serra nell'Unione Europea (UE) del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990.

La direttiva aggiornata, in linea con l'obiettivo di raggiungere un parco immobiliare completamente decarbonizzato entro il 2050, introduce - per la prima volta in modo vincolante - l'obbligo di calcolo e rendicontazione del Global Warming Potential (GWP) lungo tutto il ciclo di vita dell'edificio, secondo i principi della valutazione WLC.

Pur riconoscendo con forza la rilevanza strategica della WLC nel raggiungimento della neutralità climatica, la normativa non estende ancora l'obbligo di contabilizzazione a tutte le tipologie edilizie: la valutazione è infatti richiesta, in una prima fase - a partire dal 2028 - solo per i nuovi edifici con superficie superiore ai 1000 m<sup>2</sup>, e successivamente - dal 2030 - per tutte le nuove costruzioni.

## EU Policy Whole Life Carbon Roadmap.

A sostegno della revisione della direttiva EPBD (UE 2024/1275), l'Unione Europea ha definito una serie di piani strategici che individuano obiettivi ambiziosi in termini di riduzione delle emissioni e promuovono un'edilizia sostenibile lungo tutto il ciclo di vita degli edifici. In questo contesto si inserisce il lavoro svolto dal World Green Building Council, che nel 2022 - all'interno del progetto BuildingLife - ha pubblicato la *EU Policy Whole Life Carbon Roadmap* (WorldGBC, 2022). Questo documento rappresenta un riferimento fondamentale per raggiungere la piena decarbonizzazione del settore edilizio dell'Unione Europea, tracciando un percorso chiaro verso il conseguimento degli obiettivi del Green Deal Europeo (Commissione Europea, 2019).

Nella Roadmap viene sottolineato come, attualmente, le modalità di calcolo della WLC e la loro comparabilità variano in modo significativo tra gli Stati membri.

Viene quindi evidenziata la necessità di adottare un approccio armonizzato e coerente per la quantificazione, la rendicontazione e la definizione di soglie, in modo da garantire una base solida per l'attuazione delle normative e la definizione di obiettivi WLC realistici e confrontabili.

Inoltre, nel documento si rileva l'importanza di estendere l'analisi delle

emissioni oltre il solo carbonio operativo, includendo anche le emissioni incorporate (embodied carbon), che derivano dalle fasi che caratterizzano la vita di un edificio. A tal fine, nel documento viene sottolineata l'urgenza di raccogliere dati affidabili sulla WLC, così da poter definire benchmark specifici per le diverse tipologie edilizie ed integrare valori limite vincolanti nei quadri normativi sia europei sia nazionali.

Un ulteriore elemento chiave evidenziato nel documento riguarda la necessità di armonizzare le metodologie di calcolo:

- ai moduli della norma tecnica *UNI EN 15978* (CEN, 2011), che rappresenta uno degli standard fondamentali per la corretta applicazione della metodologia LCA nel settore delle costruzioni;
- al framework europeo *Level(s)* (Commissione Europea, 2020), un quadro metodologico che propone un linguaggio comune per la misurazione e la rendicontazione della sostenibilità degli edifici lungo il loro ciclo di vita.

La roadmap promuove allo stesso tempo la creazione di banche dati open source a livello europeo e nazionale per favorire la trasparenza e la comparabilità delle prestazioni carboniche degli edifici.

Per il raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione, è fondamentale che tutti gli Stati membri si impegnino attivamente nella riduzione delle emissioni derivanti dal settore edilizio. Occorre integrare in modo progressivo le indicazioni della Roadmap europea all'interno dei rispettivi Piani Nazionali per l'Energia e il Clima (PNIEC), in modo coordinato e coerente con gli obiettivi climatici dell'UE al 2030 e al 2050.

## EU Policy models for reducing Whole Life Carbon of Buildings.

Diversi Stati membri UE hanno già adottato modelli nazionali di regolazione della WLC. Emerge in tal senso il progetto *EU Policy Models for Reducing Whole-Life Carbon of Buildings* (Ramboll & KU Leuven, 2022), elaborato nel 2022 da Ramboll e KU Leuven e finanziato dalla European Climate Foundation. Questo lavoro si inserisce nel contesto dell'EPBD contribuendo a definirne la portata, l'ambizione e la tempistica per ridurre l'impatto climatico dell'intero ciclo di vita dell'edificio (Ramboll, s.d.).

I risultati del Progetto sono stati raccolti in due report:

1. *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings. Review of existing national legislative*

*measures*, pubblicato nel 2022.

2. *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings. Towards a whole life carbon policy for the EU*, pubblicato nel 2023.

I due documenti rappresentano fasi distinte di un processo unitario: il primo è focalizzato sulla situazione attuale mentre il secondo è rivolto alle implementazioni future di politiche per la decarbonizzazione edilizia in UE.

Il primo report offre dunque una panoramica delle misure legislative che tengono in considerazione la WLC, già in atto in diversi paesi europei, considerati i più virtuosi nella lotta alla decarbonizzazione. Nello specifico il rapporto analizza i modelli di politica esistenti in cinque diversi Stati membri dell'UE che stanno decarbonizzando il settore edilizio oltre l'energia operativa: Danimarca, Finlandia, Francia, Paesi Bassi e Svezia.

La *Tabella 2* restituisce un quadro sintetizzato dell'analisi condotta. Per ognuno dei cinque paesi viene presentato:

- quadro normativo vigente (Legal framework) - descrive le leggi e i regolamenti relativi alla valutazione e alla riduzione delle emissioni di carbonio nel ciclo di vita degli edifici attualmente in atto;
- stato di attuazione (Legislative status) - indica se le politiche sono già in vigore, in fase di sviluppo o pianificate per il futuro;
- ambito di applicazione (Applicability) - specifica quali tipologie di edifici sono soggette alle normative (residenziali, commerciali, pubblici, ecc);
- moduli inclusi nella valutazione del ciclo di vita (LCA modules) - elenca le fasi e i moduli del ciclo di vita considerate nelle valutazioni;
- componenti dell'edificio considerate (Building component) - indica se l'intero edificio o solo determinate parti (struttura portante, facciate, ecc) sono inclusi nelle valutazioni;
- metodologia di calcolo (LCA method particularities) - descrive i metodi utilizzati per calcolare le emissioni di carbonio;
- quadro di prestazione metrica (Performance framework and metric) - specifica gli indicatori utilizzati per misurare le prestazioni ambientali degli edifici;

- valori limite di emissione (Current legal limit values) - indica se sono stati stabiliti limiti specifici per le emissioni di carbonio e quali sono;
- implementazione (Implementation) - descrive le modalità pratiche con cui le politiche sono attuate;
- governance dei dati LCA (LCA data governance) - analizza come vengono raccolti, gestiti e condivisi i dati relativi all'analisi del ciclo di vita.

Le esperienze dei cinque paesi analizzati dimostrano che la regolamentazione del carbonio lungo l'intero ciclo di vita degli edifici è possibile ed auspicabile anche in contesti normativi differenti. L'efficacia di queste politiche dipende dalla definizione chiara di ambiti, di metodi di calcolo e di valori limite e dalla trasparenza dei dati. L'inclusione di tutti i moduli LCA, compresi quelli di Fine Vita (C) e dei benefici successivi (D), favorisce un approccio circolare e premia l'uso di materiali a basse emissioni.

Per una piena decarbonizzazione del settore edilizio è poi essenziale ampliare il campo d'azione delle normative anche alla riqualificazione edilizia, ancora poco considerata e promuovere una maggiore armonizzazione a livello europeo.

La creazione di database centralizzati, la cooperazione tra attori pubblici e privati e l'introduzione di programmi pilota rappresentano inoltre strumenti chiave per accelerare la decarbonizzazione del settore costruzioni in Europa.



Tabella 2 - Panoramica delle caratteristiche principali dei modelli di politica nazionale (fonte: Ramboll & KU Leuven, 2022)

|                                  | Denmark                                                                                                                                                                                         | Finland                                                                                                                                                         |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Legal framework                  | Bæredygtighedsklassen <sup>8</sup>                                                                                                                                                              | Ilmastoselvitys <sup>9</sup>                                                                                                                                    |
| Legislative status               | Agreed to come into force in January 2023                                                                                                                                                       | Proposed                                                                                                                                                        |
| Applicability                    | All new buildings<br>Limit values only apply to new buildings over 1,000 m <sup>2</sup>                                                                                                         | All new buildings, except single-family houses (low carbon practice already widespread)                                                                         |
| LCA modules                      | A1-3<br>B4, B6, C3-4, D (separate)                                                                                                                                                              | A1-3, A4-5,<br>B4, C1-4, D                                                                                                                                      |
| Building component               | Substructure, superstructure, internal finishes and building services                                                                                                                           | Alignment with building information available at building permit stage in BIM models – Proxy values for technical systems                                       |
| LCA method particularities       | Detailed LCA<br>Buildings in which special functional requirements impact material use can be compensated and allowed to exceed the limit values by a calculated amount specific to the project | Detailed LCA<br>“Carbon handprint” also required, which quantifies climate benefits (e.g. benefits from D or carbon storage). No limit values set for handprint |
| Performance framework and metric | Mandatory limit values for WLC in one metric                                                                                                                                                    | Planned mandatory limit values for WLC in one metric                                                                                                            |
| Current legal limit values       | From 2023 to 2025: 12 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /year (Revision by 2025)                                                                                                                | Under development                                                                                                                                               |
| Implementation                   | Details not yet decided<br>Calculated and reported after building completion                                                                                                                    | Submitted to local authority<br>Reporting required for building construction permit                                                                             |
| LCA data governance              | Under development                                                                                                                                                                               | Under development, alignment sought with digitalisation initiatives for BIM-based reporting                                                                     |

| France                                                                                                                                                    | Netherlands                                                                                                 | Sweden                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Réglementation environnementale 2020 <sup>10</sup>                                                                                                        | Milieuprestatie Gebouwen <sup>11</sup>                                                                      | Klimatdeklarationen <sup>12</sup>                                                                                                            |
| In force since January 2022                                                                                                                               | In force since 2018                                                                                         | In force (climate declaration) since 2022<br>Proposed (limit values)                                                                         |
| New residential, office and educational buildings                                                                                                         | New residential and office buildings over 100m <sup>2</sup>                                                 | All new buildings with exemptions for some public buildings and private developers                                                           |
| A1-3, A4-5,<br>B1-5, B6, B7, C1-4, D                                                                                                                      | A1-3, A4-5,<br>B1-4, C1-4, D                                                                                | A1-A3, A4-A5                                                                                                                                 |
| All components described in the building permit request                                                                                                   | Substructure, superstructure, installations                                                                 | Substructure and superstructure                                                                                                              |
| Dynamic LCA calculation accounting for biogenic carbon storage<br>Penalising factor if using default values rather than specific EPDs                     | Detailed LCA<br>Includes a list of 11 environmental impact categories                                       | Simplified LCA with limited scope of LCA modules and building components<br>Default values are calculated with a 25% conservativeness factor |
| Mandatory limit values as separate metrics for EC and OC (energy use)<br>Limit value calculated for each building individually                            | Mandatory limit values are expressed as a monetary value (environmental shadow price of building materials) | Mandatory limit values to be developed<br>Currently only requirement for climate declaration                                                 |
| Current limit values for embodied impacts:<br>640 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (SFH)<br>740 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (MFH)                  | Residential: 0.8 EUR/m <sup>2</sup> /year<br>Offices: 1 EUR/m <sup>2</sup> /year                            | To be developed before 2027                                                                                                                  |
| Submitted to local authority<br>Calculation capacity described in permit request; confirmation of compliance required after completion                    | Submitted to local authority<br>Reporting required for request of environmental permit                      | Submitted to central authority<br>Reporting required for use permit at building completion                                                   |
| No further access to mandatory LCA data<br>The centralised database for WLC/LCA reporting of E+C- programme remains publicly available in anonymised form | No central collection or public database of LCA results                                                     | Centralised collection of data for analysis by national agency<br>Data not systematically available, only on specific request                |

A partire dalle esperienze analizzate e dalle considerazioni emerse, nel secondo report del progetto - *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings. Towards a whole life carbon policy for the EU* (Ramboll & KU Leuven, 2023) - sono state avanzate proposte concrete per l'integrazione sistematica della dimensione WLC nella revisione della *Direttiva EPBD* (UE 2024/1275). Il documento delinea un modello comune europeo per la valutazione e la riduzione delle emissioni climateranti lungo l'intero ciclo di vita degli edifici che consenta un monitoraggio armonizzato e una governance coerente degli impatti climatici in tutti i ventisette Stati membri dell'UE (Ramboll & KU Leuven, 2023).

Il report evidenzia che uno dei principali ostacoli alla decarbonizzazione è la disomogeneità di metodi di calcolo, di definizioni e di metriche adottati a livello nazionale. Di conseguenza:

- una valutazione trasparente e comparabile degli sforzi di riduzione del carbonio rispetto agli obiettivi climatici risulta estremamente complessa e i confronti tra edifici progettati in diversi Paesi sono quasi impossibili;
- progettisti, sviluppatori e altri attori della filiera edilizia si trovano ad operare in un contesto frammentato, che ostacola la cooperazione transfrontaliera, la concorrenza leale e la diffusione di best practice per edifici a basse emissioni;
- l'assenza di regole comuni comporta un aumento dei costi per l'industria, dovuto alla necessità di strumenti, di dati e di processi differenziati per ciascun contesto nazionale.

Pur riconoscendo la necessità di una metodologia comune, il documento sottolinea l'importanza di tenere conto delle differenze strutturali tra i mercati nazionali e i livelli di maturità normativa. L'obiettivo di garantire una riduzione coordinata delle emissioni e migliorare l'efficienza del settore edilizio europeo deve essere bilanciato con un certo grado di flessibilità per le politiche e pratiche locali.

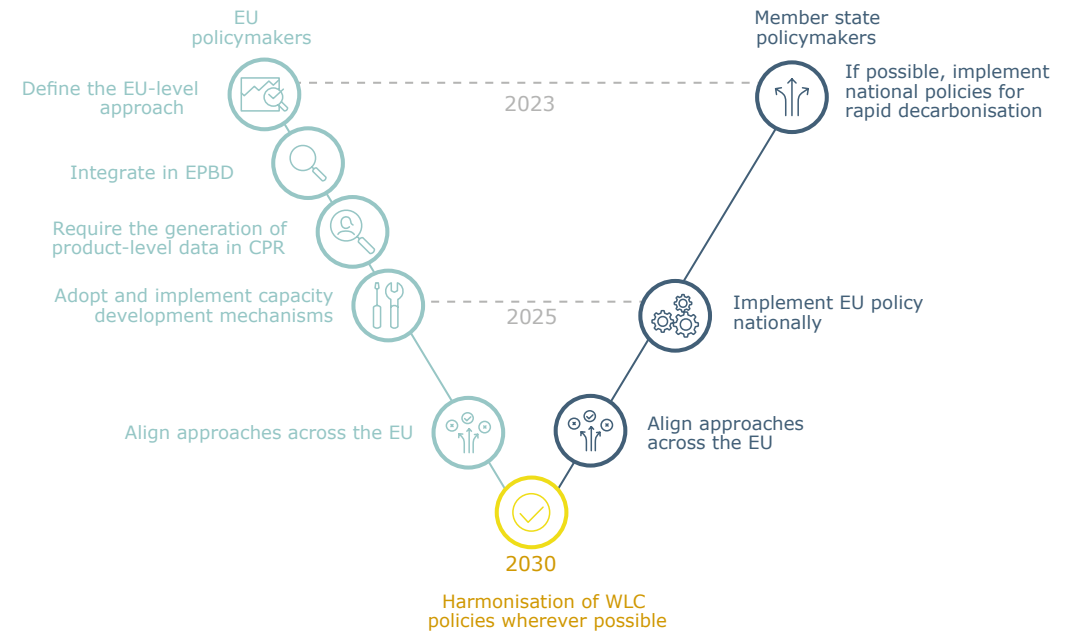
Il modello proposto si fonda su una base metodologica comune a livello UE per la valutazione e la riduzione della WLC, con l'obiettivo finale di armonizzare progressivamente i quadri normativi nazionali.

Il modello politico – schematizzato in *Figura 2* – si articola su tre livelli principali:

1. Legislazione europea che definisce gli elementi essenziali per il monitoraggio, la rendicontazione e la governance del WLC in tutti i Paesi membri, inclusi quelli privi di strumenti LCA/WLC esistenti;

2. Riconoscimento dei modelli nazionali esistenti, purché coerenti con gli standard europei e in linea con i requisiti minimi per una decarbonizzazione efficace;
3. Processo progressivo di armonizzazione, finalizzato a garantire coerenza metodologica e confrontabilità dei risultati tra tutti gli Stati membri.

Figura 2 - Prossime tappe verso una politica europea sulla WLC (fonte: Ramboll & KU Leuven, 2023)



## INDICATE LIFE

Il progetto europeo *INDICATE LIFE* (Smith Innovation, 2024), co-finanziato dalla CE all'interno del programma *LIFE 2030 Clean Energy Transition* (Commissione Europea, 2023) si pone come obiettivo principale quello di elaborare benchmark e target nazionali sulle emissioni WLC, fornendo basi scientifiche per definire percorsi di decarbonizzazione applicabili sia alle nuove costruzioni che agli interventi di riqualificazione. (Green Building Council Italia)

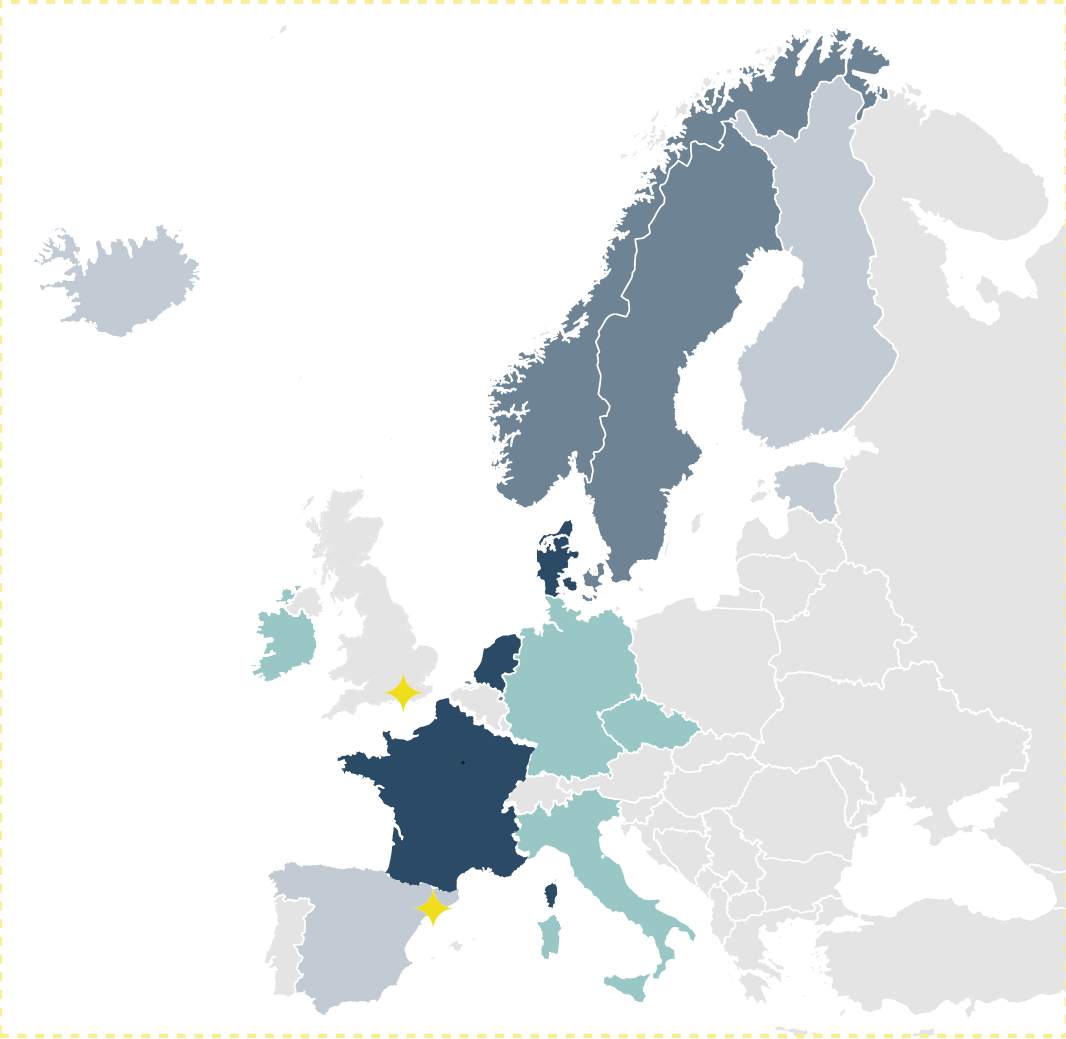
Il progetto *INDICATE LIFE* – in una prima fase pilota tra il 2014 e il 2022 - ha coinvolto attivamente Spagna, Repubblica Ceca e Irlanda per sviluppare e testare benchmark WLC. Le esperienze di queste nazioni offrono lezioni importanti per altri paesi europei che desiderano sviluppare e implementare politiche di decarbonizzazione del settore edilizio. Nel 2024 ha preso avvio una seconda fase del progetto, che prevede l'adesione di altri cinque paesi dell'UE – Italia, Austria, Lussemburgo,

Croazia e Ungheria – con l’obiettivo di aumentare la qualità, le quantità e l’applicazione dei dati LCA a livello edilizio, al fine di regolamentare e ridurre l’impronta WLC degli edifici.  
Le esperienze delle prime tre nazioni coinvolte nel progetto hanno evidenziato chiaramente la necessità di:

- trasparenza e coerenza metodologica - per una comparabilità efficace, è fondamentale che tutti i progetti utilizzino metodi di calcolo e dati di base coerenti;
- coinvolgimento degli stakeholder - l’interazione con esperti, enti locali, e sviluppatori è cruciale per garantire che le politiche siano rilevanti e praticabili.
- incentivi finanziari (la partecipazione dei fornitori di dati può essere incentivata tramite compensazioni economiche o accesso ai database di benchmark);
- formazione per il calcolo - la creazione di capacità interne nei gruppi di progettazione e tra i professionisti del settore è essenziale per implementare efficacemente le misurazioni WLC.

La *Figura 3* mostra una fotografia dello stato di sviluppo di azioni rivolte alla decarbonizzazione (WLC) del settore edilizio nell’UE al 2022: alcuni Stati membri hanno già introdotto misure legislative per garantire la misurazione e la divulgazione sistematica e coerente del WLC degli edifici, mentre altri paesi sono ancora in fase di avvio di iniziative per la misurazione e la definizione di benchmark del WLC.

Figura 3 - Panoramica della regolamentazione e delle iniziative sulla WLC in Europa, basata su: Steinmann et al. 2022, Balouktsi, Francart & Kanafani 2024, BPIE (Elaborazione dell'Autore su fonte Ramboll & KU Leuven, 2023)



- **WLC regulation with limit values in force**
  - DENMARK - Limit values since 2023
  - NETHERLANDS - Limit values since 2018
  - FRANCE - WLC limit values in force since 2022
- **WLC disclosure requirements in force**
  - SWEDEN - WLC disclosure requirements in place since 2022, limit values proposed for 2025
  - NORWAY - WLC disclosure requirement since 2023
- **WLC legislation (disclosure/limit values) proposed**
  - FINLAND - WLC disclosure requirements will be implemented in 2025, limit values in development.
  - ESTONIA - WLC disclosure requirements to be introduced in 2025, limit values in development (possibly 2027)
  - SPAIN - WLC disclosure requirements in preparation, possibly by 2026
- **Other non-legislative requirements in place or preparing for WLC measurement and benchmarking**
  - IRELAND - Proposed inclusion of WLC in GPP and disclosure requirements among specific public bodies
  - GERMANY - LCA for public buildings and recipients of public funding
  - CZECHIA - Non-legislative WLC benchmarking initiative underway. National WLC method in development
  - ITALY - LCA requirements for public buildings. Non-legislative initiative focusing on benchmarking starts in 2024
- ★ **Local jurisdictions with disclosure requirements linked to permits of public procurement**
  - LONDON (UK)
  - MADRID (Spain)

### 3.3.1 Il contesto italiano

#### Roadmap italiana per la decarbonizzazione e la trasformazione sostenibile in edilizia

Il World Green Building Council (WGBC), promuove la delineazione di National Building Climate Action Roadmaps (sostitutive delle long-term renovation strategies), al fine di garantire che tutto il parco edilizio – esistente e futuro – venga incluso nei piani nazionali. Ogni roadmap nazionale è chiamata a:

- indicare, a livello locale, l'impatto del patrimonio edilizio sul totale delle emissioni di carbonio;
- definire una traiettoria per raggiungere il net zero WLC per tutti gli edifici entro il 2050;
- predisporre dei valori limite di emissione che facilitino il raggiungimento di un net zero emission building

L'Italia ha iniziato a recepire le indicazioni europee attraverso la definizione di una roadmap nazionale per l'introduzione progressiva della valutazione WLC, tracciando obiettivi e priorità su scala nazionale. La *Roadmap italiana per la decarbonizzazione e la trasformazione sostenibile in edilizia* (GBC Italia, 2022), sviluppata da GBC Italia nell'ambito del progetto *Buildinglife*, propone una tabella di marcia composta da cinquantatré obiettivi suddivisi in tre aree d'azione prioritarie:

- AREA 1- decarbonizzazione degli edifici
- AREA 2 - circolarità per il settore delle costruzioni
- AREA 3 - qualità e resilienza delle città

A supporto degli obiettivi e delle azioni espressi nel documento *Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito. Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050* (GBC Italia, 2022) GBC Italia ha sviluppato – in collaborazione con i suoi gruppi partner - quattro pubblicazioni (che ne costituiscono le fondamenta tecniche):

- *Il contesto energetico nazionale: normativa, piani e scenari di decarbonizzazione* (GBC Italia, 2023)
- *La finanza privata e pubblica per la decarbonizzazione del settore edilizio* (GBC Italia, 2023)
- *Soluzioni tecnologiche per la decarbonizzazione delle emissioni operative degli edifici* (Pelluchetti & Calderoni & Lodigiani & Giorgi & D'Angelo & Cocco, 2022)

- *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio.* (Andreotti & Giordano, 2024). In questa pubblicazione viene proposta una metodologia nazionale per il calcolo della WLC che è stata applicata in questa tesi.

#### Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio.

Il documento, redatto da un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino, offre un quadro metodologico per calcolare, monitorare e ridurre il carbonio incorporato durante il ciclo di vita di un manufatto edilizio. Il lavoro, oltre a rispondere agli obiettivi del progetto BuildingLife, fornisce linee guida operative per progettisti e decisori politici, promuovendo un approccio che non solo rafforza l'impegno italiano verso un'edilizia sostenibile, ma consolida anche il ruolo cruciale del settore delle costruzioni nella lotta al cambiamento climatico globale.

Più precisamente, nel documento vengono definiti gli aspetti metodologici per la contabilizzazione degli indicatori Embodied e Operational Carbon e per la valutazione Whole Life Carbon e Circular Economy di un manufatto edilizio.

*Strumenti per la decarbonizzazione [...]* (Andreotti & Giordano, 2024) fornisce inoltre un quadro di informazioni utili all'implementazione di alcuni requisiti stabiliti nella *Direttiva EPBD* (UE 2024/1275), con particolare attenzione verso il calcolo del Global Warming Potential (GWP) nel corso del ciclo di vita dell'edificio.

Nel report vengono illustrati i passaggi da attuare per la valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq secondo due metodi - entrambi allineati allo strumento europeo Level(s) (Commissione Europea, 2020) - distinti in funzione del livello di sviluppo del progetto e, soprattutto, della tipologia di dati a disposizione:

- Il METODO BASE è indicato per la valutazione delle emissioni legate a un progetto in fase preliminare e utilizza dati generici (si tratta del metodo applicato in questa tesi per la valutazione del caso studio);
- il METODO AVANZATO, invece, fa riferimento ai successivi livelli di progettazione e si riferisce a dati specifici.



Il report si compone di due parti principali:

1. "Parte prima. Embodied Carbon e Operational Carbon: definizioni e requisiti" si concentra sulle definizioni, sui riferimenti normativi e sugli elementi che devono e/o possono essere considerati ai fini del processo di contabilizzazione dell'EC, dell'OC e della valutazione WLC:

- tipologie di manufatti;
- definizione delle fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio;
- metodo di contabilizzazione base e metodo avanzato;
- confini temporali del processo di contabilizzazione;
- unità di misura per la contabilizzazione
- indicazione dei principali database disponibili.

2. Parte seconda. Whole Life Carbon: guida alla valutazione" illustra le singole fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio e le metodologie specifiche di contabilizzazione e di valutazione dell'EC e dell'OC di un edificio.

Oltre alle fasi A1-C4 è presentata una fase "D-Oltre al ciclo di vita" (da valutare separatamente) che tiene in considerazione la Circular Economy; quest'ultima è riferita ai possibili benefici e impatti legati ad operazioni di riciclo, di riuso, di recupero, a cui i materiali e i prodotti possono essere sottoposti a valle del processo di demolizione e di trasformazione dei rifiuti (C1-C4). In questa fase rientrano anche i potenziali benefici derivanti da operazioni di compensazione tramite vegetazione (Carbon off-set) o altra soluzione (Carbon Capture&Storage).

In questa sezione, una particolare attenzione viene dedicata alla determinazione dell'EC degli "impianti e servizi MEP", poiché responsabili di una serie di impatti che, sebbene in passato siano stati spesso ignorati, non possono più essere trascurati. Anche per questi elementi, come per il processo edilizio, sono definiti due metodi, uno Base e uno Avanzato, per i quali viene indicata la modalità di calcolo da eseguire in base ai dati a disposizione (Dati Medi Generici, Key Material, Verified data).

# PARTE II

---

## 4. L'EMBODIED CARBON DEGLI IMPIANTI



La seconda parte della tesi si concentra sulla valutazione delle emissioni EC di cui sono responsabili i sistemi meccanici, elettrici e idraulici presenti negli edifici.

La comprensione degli impatti dovuti alla produzione degli impianti, e della loro incidenza sulla valutazione WLC, è un tema ad oggi poco esplorato ma indispensabile per allinearsi alle direttive dell'EPBD. Infatti, secondo alcuni recenti studi (Ramachandra, 2024) la magnitudo dell'EC di questi sistemi può variare tra il 15% e il 50% nell'EC totale di un edificio commerciale e fino al 50% nelle ristrutturazioni. Questa rilevante incidenza è attribuibile all'elevata frequenza di sostituzione dei componenti, all'uso di refrigeranti ad alto potenziale di riscaldamento globale (GWP) e al sovradimensionamento impiantistico di cui spesso sono oggetto. (Ramachandran, 2024)

## 4.1 DEFINIZIONE DI MECHANICAL ELECTRICAL AND PLUMBING (MEP)

L'acronimo MEP indica una categoria di elementi meccanici, elettrici e idraulici (e relativi sistemi tecnici) comunemente utilizzati per il raggiungimento di prestazioni di comfort e funzionalità all'interno degli edifici. Più nel dettaglio, i sistemi MEP assolvono a una serie di funzioni di controllo e gestione delle dinamiche di confort del manufatto edilizio, tra cui la regolazione della temperatura, dell'umidità, della ventilazione, del deflusso delle acque di scarico e di quelle piovane, del funzionamento di impianti elettrici e della domotica.

Si tratta di sistemi largamente utilizzati all'interno degli edifici, la cui composizione risulta articolata e complessa; tale da renderne difficoltosa la contabilizzazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq e la valutazione WLC.

## 4.2 IL CONTRIBUTO DEI MEP AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

I sistemi presenti nell'edificio risultano impattanti per l'ambiente sia in termini di OC, risultato dell'uso energetico e idrico, che di EC, in funzione dei materiali costituenti.

Considerando il 2020 come anno di riferimento, in UE l'impatto dell'OC dovuto all'utilizzo dei MEP è stato del 79% delle emissioni; il residuo 21% di emissioni è risultato invece legato all'EC correlato agli elementi dell'edificio (Commissione Europea, 2023).

Nell'ambito del EC legato agli edifici, alcuni studi evidenziano che i

sistemi MEP sono responsabili dal 2% al 27% delle emissioni in progetti di nuova costruzione e del 75% nei progetti di ristrutturazione (Andreotti & Giordano, 2024).

È auspicabile che alcune azioni possano essere condotte per ridurre le emissioni legate agli impianti. Secondo lo scenario TECH-Build, sviluppato dalla Commissione Europea, si ipotizza che entro il 2050 il progresso tecnologico consentirà di ridurre i livelli di carbonio dell'intero ciclo di vita del 68%. (Commissione Europea, 2023)

Questa riduzione potenziale è da attribuirsi a una netta diminuzione (del 90%), entro il 2050, delle emissioni operative, rispetto all'anno di riferimento 2020.

L'efficienza energetica dello stock edilizio può essere ottenuta mediante due azioni:

- ristrutturazioni, volte a ottimizzare i fabbisogni energetici degli edifici;
- riduzioni delle emissioni connesse alla produzione dell'energia (decarbonizzazione dell'infrastruttura energetica).

Tuttavia, nel primo caso, i benefici relativi dovuti a un efficientamento della fase operativa (OC) comporterebbero un aumento dell'EC. Per limitare tali emissioni è necessario adottare nei progetti sistemi la quale produzione, installazione, manutenzione e smaltimento risultino a basso tenore di carbonio incorporato.

Nell'ottica di ridurre l'EC associata ai MEP, i documenti tecnici e la letteratura scientifica presa in esame propongono diverse linee guida.

Una prima azione riguarda la così detta progettazione "snella" dei MEP (Hamot & Bagenal, 2021) caratterizzata da una riduzione del fabbisogno energetico annuale di un edificio dovuto a un'ottimizzazione della progettazione.

Una seconda misura è connessa alla scelta consapevole di MEP altamente efficienti, i cui processi produttivi siano certificati come a basso impatto ambientale. A tal proposito è auspicabile che nei prossimi anni le aziende produttrici si impegnino sempre di più nella valutazione degli impatti ambientali di cui sono responsabili i MEP durante il loro ciclo di vita e nella divulgazione dei dati ottenuti in forma coerente e confrontabile. Nell'industria dei servizi di costruzione manca infatti una conoscenza completa dell'EC dei MEP e di come essa possa variare in funzione di alcuni aspetti specifici (es. materiali, tipologie di gas, dimensione dell'impianto, ecc.). Allo scopo di colmare tali lacune, si segnala che CIBSE – attraverso la pubblicazione della *TM65 Embodied carbon in building services: A*

*calculation methodology* (Hamot & Bagenal, 2021) – promuove un metodo di calcolo standardizzato dell’EC dei MEP (distinguendo le procedure di contabilizzazione a seconda del grado di dettaglio dei dati a disposizione) e incoraggia, al tempo stesso, la condivisione dei calcoli e dei risultati tramite la compilazione di un modulo standard, al fine di rendere questo tipo di valutazioni una pratica comune.

Si rammenta che a livello italiano, la metodologia di calcolo è stata recepita e integrata nel documento *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio* (Andreotti & Giordano, 2024).

4.3 METODOLOGIA DI CALCOLO DELL’EMBODIED CARBON (EC) DEGLI ELEMENTI MEP

Il documento “Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio” (Andreotti & Giordano, 2024), in conformità con i riferimenti normativi (UNI EN 15978:2011) e tecnici (Hamot & Bagenal, 2021), espone i passaggi per contabilizzare le emissioni EC legate agli impianti e servizi MEP.

In particolare, nel documento sono stati elaborati due metodi di calcolo, il “metodo BASE” ed il “metodo AVANZATO”, diversificati a seconda del livello di approfondimento e della tipologia dei dati che si hanno a disposizione.

Il metodo di calcolo BASE è legato a una progettazione preliminare e si basa sull’utilizzo di dati generici; nel dettaglio, il calcolo può basarsi su due tipologie di informazioni:

- dati Medi Generici di MEP presenti su banche dati;
- materiali principali (Key Materials) che costituiscono un MEP

Il metodo di calcolo AVANZATO si riferisce invece a una fase di progettazione più approfondita, caratterizzata dalla presenza di dati specifici; in particolare la procedura può essere condotta in funzione di due diverse tipologie di informazioni.

- dati verificati (Verified data) rintracciabili negli EPD o in altre valutazioni del profilo ambientale dello specifico MEP in analisi (quando disponibili);
- materiali principali (Key Materials) che costituiscono il MEP, elaborati tramite un confronto tra il valutatore e il produttore o progettista dell’impianto.

In virtù dei dati disponibili, nell’ambito della tesi è stato utilizzato il metodo di calcolo BASE “Dati Medi Generici” (Figura 4) e quello BASE “Key Materials” (Figura 5). Entrambi i metodi consentono di stimare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq dei MEP mediante l’utilizzo di una procedura semplificata e l’impiego di fattori correttivi (denominati “buffer factor”).

Figura 4 -Quadro sinottico del metodo di calcolo BASE: modalità “dati medi generici” (Andreotti & Giordano, 2024, p. 140)

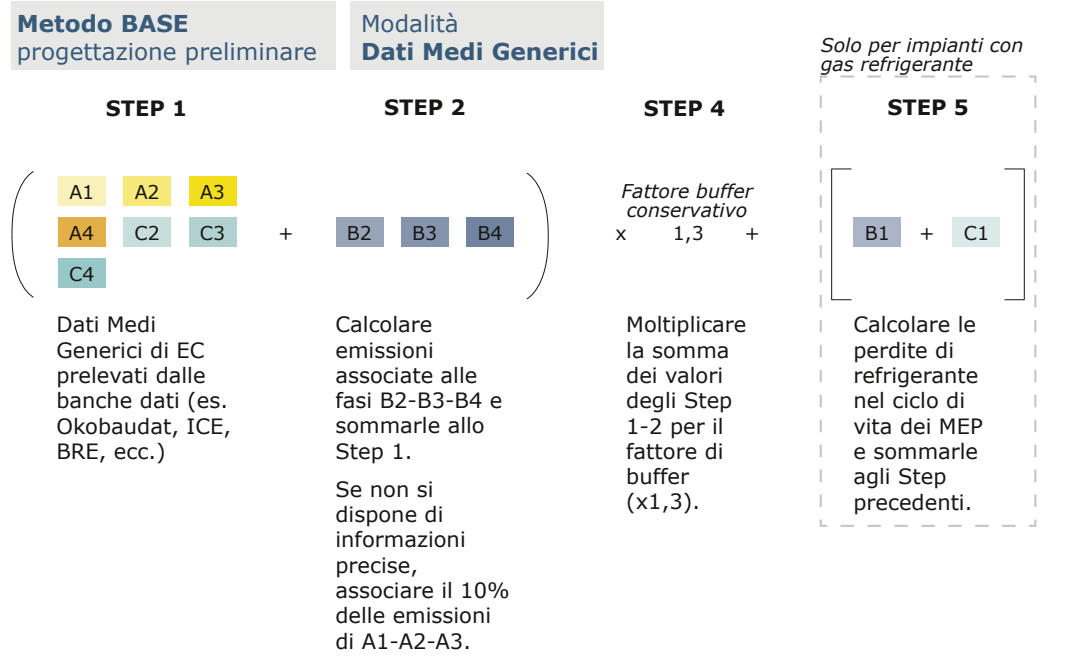
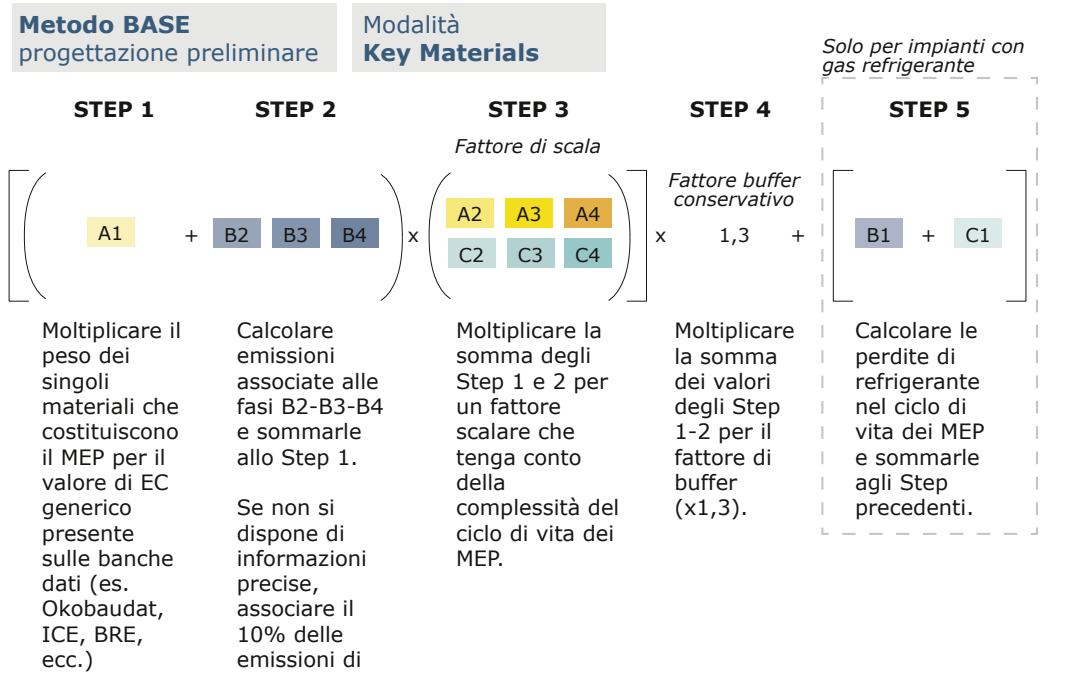


Figura 5 -Quadro sinottico del metodo di calcolo BASE: modalità “Key materials” (Andreotti & Giordano, 2024, p. 140)



4.4 CONTABILIZZAZIONE EC DEI MEP PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA RINNOVABILE

La produzione di energia rinnovabile, attraverso fonti come l’energia solare, eolica e geotermica, può essere efficacemente integrata nei sistemi MEP per migliorare la sostenibilità degli edifici. Tale integrazione rappresenta infatti una strategia chiave per ridurre l’impatto ambientale degli edifici e contribuire agli obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione. Questa sinergia non solo migliora l’efficienza energetica degli edifici, ma promuove anche un utilizzo più responsabile e sostenibile delle risorse naturali, rispondendo alle contemporanee sfide ambientali. Le fonti di energia rinnovabile stanno dunque diventando un’alternativa valida all’energia fornita dalla rete, soppiantando i tradizionali sistemi di produzione.

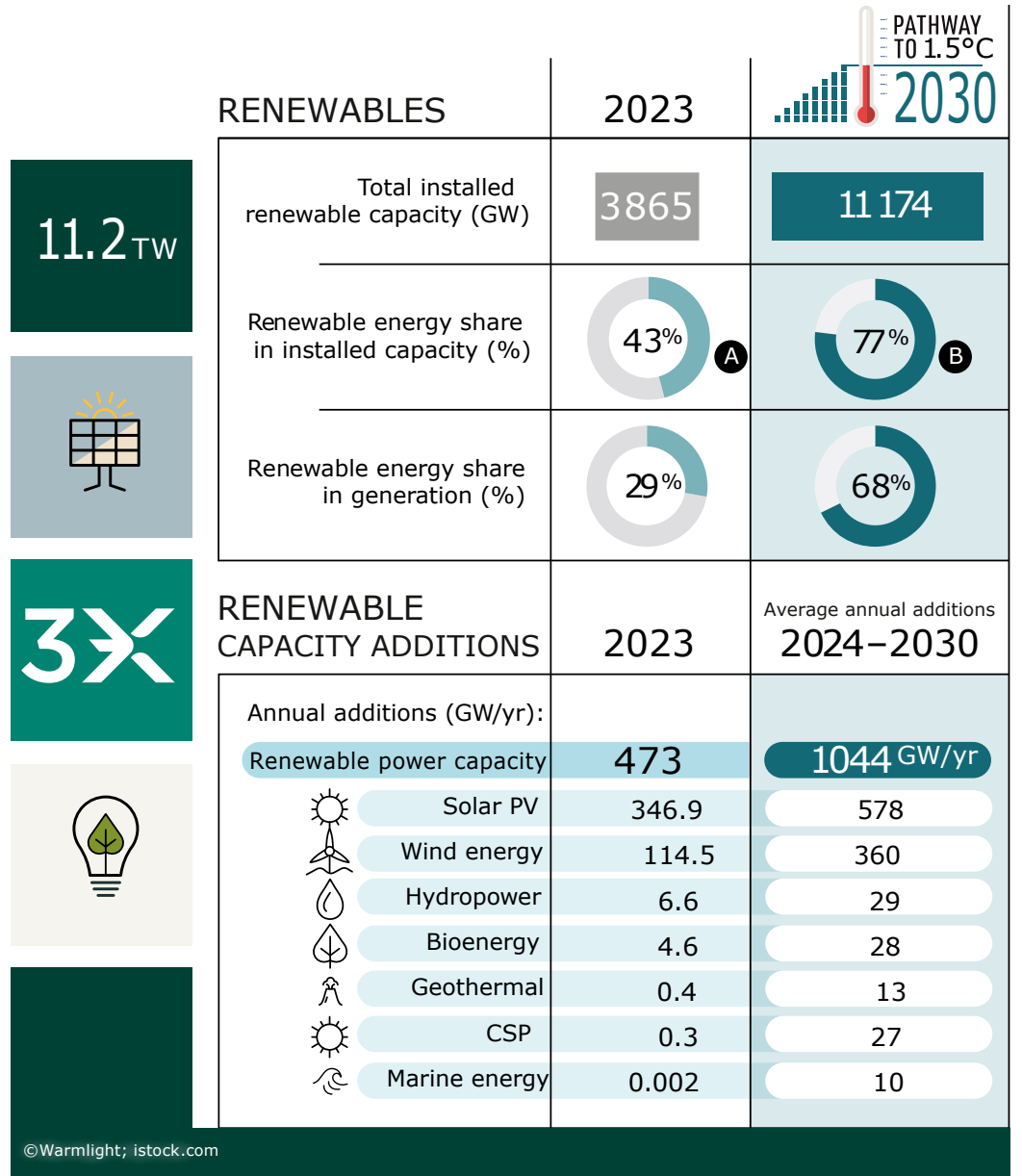
L’obiettivo stabilito dalla COP28 di limitare l’aumento medio globale della temperatura a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali entro la fine del secolo è supportato dallo “scenario 1,5°C” elaborato nel *World Energy Transitions Outlook 2023* di IRENA (IRENA, 2023). Lo scenario prevede una forte e continua riduzione delle emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) fino a raggiungere zero emissioni nette entro il 2050 e si basa sull’uso di soluzioni tecnologiche già disponibili, facendo riferimento in particolare alle energie rinnovabili a basso costo combinate con misure di efficienza energetica (International Renewable Energy Agency, 2024).

Per ottenere tale obiettivo è necessaria una triplicazione della capacità globale installata di energia rinnovabile entro il 2030 rispetto ai livelli del 2022. Centotrentatré Paesi, in sede COP28, si sono già impegnati in tale processo (International Renewable Energy Agency, 2024).

Come mostrato in *Figura 6* Nel 2023 è stata raggiunta a livello globale una capacità record di 473 gigawatt (GW) di energia rinnovabile, con un aumento del 54% rispetto al 2022; tuttavia, questo ritmo di crescita è ancora insufficiente per raggiungere l’obiettivo di 11,2 terawatt (TW) entro il 2030 (International Renewable Energy Agency, 2024).

Per triplicare la capacità di energia rinnovabile e raggiungere 11,2 TW entro il 2030, sarà necessario un incremento medio annuo di 1.044 GW tra il 2024 e il 2030 (inclusi), pari a un tasso di crescita annuo composto del 16,4% nella capacità totale installata di energia rinnovabile, in aumento rispetto al 16,1% richiesto per il periodo 2022-2030 (International Renewable Energy Agency, 2024).

Figura 6 - Monitoraggio dei risultati della COP28: triplicare l'energia rinnovabile entro il 2030 (Elaborazione dell'autrice su fonte International Renewable Energy Agency, 2024).



Based on: (IRENA, 2023a; 2024a).  
Notes: TW = terrawatt; GW = gigawatt; yr = year; PV = photovoltaic; CSP = concentrated solar power; wind data includes onshore and offshore; hydropower data excludes pumped hydro.

#### 4.4.1 I sistemi fotovoltaici

Quella fotovoltaica è attualmente l'unica tecnologia rinnovabile in linea con la traiettoria necessaria per raggiungere l'obiettivo di capacità installata entro il 2030 promosso dallo "scenario 1,5°C" di IREA. Questo settore ha infatti registrato un'accelerazione significativa, con un incremento del 73% dal 2022 al 2024 (International Renewable Energy Agency, 2024).

Per garantire il raggiungimento dell'obiettivo, sarà tuttavia necessario un ulteriore aumento delle nuove installazioni, con una media di 578 GW di capacità solare fotovoltaica aggiunta ogni anno tra il 2024 e il 2030. Tale scenario è concretamente realizzabile grazie alla forte competitività dei costi della tecnologia, ai brevi tempi di sviluppo dei progetti, all'eccellente potenziale delle risorse disponibili e alla capacità produttiva globale lungo l'intera catena di approvvigionamento del fotovoltaico solare (International Renewable Energy Agency, 2024).

La tecnologia fotovoltaica (PV), realizzata impiegando materiali semiconduttori, converte i fotoni in elettricità: quando la luce solare colpisce questi materiali, i fotoni con una certa lunghezza d'onda innescano il flusso di elettroni attraverso i materiali con la conseguente produzione di corrente continua. I pannelli PV attualmente in commercio si dividono, a seconda della tecnologia utilizzata, in: silicio mono-cristallino, silicio multi-cristallino, silicio amorfo e a film sottile (come il tellururo di cadmio).

Un impianto fotovoltaico è essenzialmente composto da:

- un generatore, costituito dall'insieme dei "moduli fotovoltaici" (più comunemente conosciuti come "pannelli solari" o "pannelli fotovoltaici"), di cui il componente base è la cella;
- un sistema di conversione dell'energia (noto come "inverter") che trasforma l'energia prodotta dal pannello (corrente continua) in una forma utilizzabile dagli edifici (corrente alternata);
- un eventuale "accumulatore di energia", ossia una batteria che può essere aggiunta all'impianto fotovoltaico tradizionale per immagazzinare l'energia al fine di futuri utilizzi;
- una "struttura di sostegno" utilizzata per il montaggio su coperture inclinate, oppure sotto forma di telai metallici fissi o mobili per la posa su superfici piane;
- un "sistema di monitoraggio" dell'impianto, utile a tenere sotto controllo lo stato di funzionamento dell'intero sistema; offre informazioni relative ai pannelli fotovoltaici, all'inverter, allo stato della rete elettrica e alla capacità produttiva dell'impianto nel suo insieme;
- elementi per la distribuzione (es. cavi).

Tutti gli elementi presenti in un sistema PV, al di fuori dei pannelli, fanno parte della categoria BOS (Balance of system); questi elementi sono essenziali per l'installazione, il funzionamento e la manutenzione del sistema fotovoltaico, garantendo che l'energia solare raccolta possa essere utilizzata in modo efficiente e sicuro.

#### Criteri per la contabilizzazione

L'obiettivo del calcolo è stato la quantificazione dell'EC di un'unità tipo di sistema fotovoltaico. Con "unità tipo" si intende un elemento rappresentativo della tipologia di pannello, ottenuto mediante confronto e interpolazione dei dati afferenti a diversi pannelli, in funzione della specifica tecnologia della cella.

Si sono così condotte analisi distinte, una per la categoria dei pannelli mono e poli cristallini e una per i pannelli al tellururo di cadmio; i cui risultati hanno condotto alla realizzazione di due "modelli tipo":

- A\_ silicio (mono e poli cristallino);
- B\_ tellururo di cadmio.

Nonostante i sistemi fotovoltaici necessitino, oltre al pannello, degli elementi appartenenti alla categoria BOS, l'analisi si è concentrata unicamente sulla quantificazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq relative all'elemento "pannello".

#### Modello A – Silicio

La FU individuata per il calcolo è quella di 1 m<sup>2</sup> di superficie. In questo modo il progettista, per determinare l'impatto del proprio progetto, dovrà conoscere unicamente la superficie in m<sup>2</sup> di pannelli che intende installare.

L'analisi condotta comprende tutte le fasi e i relativi moduli del ciclo di vita, in particolare:

- A – Produzione e Costruzione
- B – Uso
- C – Fine vita

La procedura di calcolo utilizzata è il "metodo di calcolo BASE per key materials" [vedi *Figura 5*].

La determinazione degli impatti dei materiali costituenti è stata condotta mediante l'utilizzo di coefficienti di emissione specifica ottenuti tramite una media fra valori provenienti da differenti database (ICE e ÖKOBAUDAT), o mediante l'utilizzo di programmi per la valutazione degli impatti ambientali dei prodotti e dei servizi (software SimaPro).



La vita utile individuata è di 30 anni, moda delle vite utili dei pannelli fotovoltaici presi in considerazione.

L'analisi non tiene in considerazione la possibilità di danneggiamento del pannello a causa di eventi rari (come la rottura del vetro). Si segnala inoltre che i documenti di riferimento evidenziano che non è richiesta alcuna manutenzione, riparazione, sostituzione o ristrutturazione durante la vita utile del modulo. Tuttavia, nel calcolo è stato utilizzato un fattore cautelativo, al fine di tenere in considerazione eventuali piccole operazioni di manutenzione e/o sostituzione di elementi esclusi dal perimetro di indagine dello studio (es. inverter, sistema di distribuzione, sistema di monitoraggio).

### Modello B- Tellururo di cadmio

Come per il modello A, la FU individuata per il calcolo è quella di 1 m<sup>2</sup> di superficie.

L'analisi condotta comprende tutti i moduli e le relative fasi del ciclo di vita, in particolare:

- A – Produzione e costruzione;
- B – Uso;
- C – Fine vita.

È stato adottato il "metodo di calcolo BASE per key materials" [vedi Figura 5].

La determinazione degli impatti dei materiali costituenti è stata condotta mediante l'utilizzo di coefficienti di emissione specifica ottenuti tramite una media fra valori provenienti da differenti database (ICE e ÖKOBAUDAT).

Si è ipotizzato una durata media di vita utile di 30 anni.

Le assunzioni relative alla manutenzione o alla sostituzione di componenti dell'impianto sono le stesse descritte per il "Modello A - silicio".

### Inventario

Dopo una prima analisi e raccolta dati è emersa una rilevante differenza di composizione fra i sistemi Mono/Poli-cristallini e quelli al tellururo di cadmio, per questo sono stati condotti rispettivamente due diversi inventari al fine di ottenere due modelli tipo (A e B).

Al fine di determinare i materiali costituenti dei sistemi fotovoltaici e i relativi pesi, le informazioni necessarie sono state rintracciate tramite una revisione della letteratura, una selezione di report tecnici e Dichiarazioni Ambientali di Prodotto.

### Modello A – Silicio

Per l'analisi dei sistemi Mono e Poli cristallini è stato condotto un confronto fra dati presenti in letteratura, in report tecnici ed EPD di sistemi PV disponibili. In particolare, si è costruito un dataset di 7 casi: 2 provenienti da paper scientifici, 3 provenienti da EPD e 2 da report tecnico.

I criteri utilizzati per la selezione dei casi sono stati:

- che la FU fosse di 1 m<sup>2</sup>;
- che la somma dei principali materiali costituenti individuati ricoprisse almeno il 95% del peso totale.

Come esposto nella *Tabella 3*:

- i casi 1 e 2 sono stati estrapolati dalla letteratura, e rappresentano degli inventari del ciclo di vita (LCI) semplificati per il 2006, compilati dai dati di undici impianti europei e due statunitensi, insieme ai valori presenti nella letteratura di Alsema e de Wild-Scholten (2005) e Fthenakis e Kim (2005);
- i casi 3, 4 e 5 sono invece tratti da Dichiarazioni ambientali di prodotto Type III (EPD); i moduli fotovoltaici monocristallini in questione sono progettati per essere installati sui tetti o come sistemi autonomi per la produzione locale di energia. In ognuno degli EPD da cui provengono i casi sono analizzati diversi moduli con piccole variazioni nelle dimensioni, numero di celle, potenza, ecc. La variazione tra i risultati di ciascuna modulo è inferiore al 10%; di conseguenza, si è deciso di selezionare un singolo caso per ogni EPD;
- i casi 6 e 7 sono due inventari presenti all'interno di un report tecnico riferiti a un pannello fotovoltaico realizzato con singolo cristallo di silicio (Mono-Si) e un pannello fotovoltaico realizzato con silicio policristallino (Poli-Si).

Nella *Tabella 4* è riportato l'inventario con le percentuali legate ai principali materiali costituenti del modello tipo, individuata grazie all'analisi e alla media dei valori dei casi studio selezionati.

Tramite la media fra i pesi al m<sup>2</sup> dei casi selezionati si è ottenuto il peso medio del "modello tipo" per l'unità funzionale e i relativi pesi parziali dei materiali costituenti.

Gli impatti dei materiali costituenti sono stati contabilizzati mediante l'utilizzo dei coefficienti di emissione specifica riportati nella *Tabella 5*.



Tabella 3 - Casi studio e relative fonti del Modello A - PV Si

|        | FONTE          |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASO 1 | Letteratura    | Fthenakis, V., Raugei, M. (2017). Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems.                                                                                                                                                                                               |
| CASO 2 |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CASO 3 | EPD            | Environmental Product Declaration In accordance with ISO14025:2006 and EN15804:2012+A2:2019 Mono-crystalline Double glass, P-Type, solar photovoltaic modules                                                                                                                                |
| CASO 4 | EPD            |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CASO 5 | EPD            |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CASO 6 | Report tecnico | Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., & Stucki, M. (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). |
| CASO 7 |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Tabella 4 - LCI del Modello A - PV Si

| MATERIALE       | PERCENTUALE [%] | PESO [kg] |
|-----------------|-----------------|-----------|
| Silicio         | 6,04            | 0,97      |
| EVA             | 6,90            | 1,10      |
| Vetro           | 77,20           | 12,35     |
| Alluminio       | 7,86            | 1,26      |
| Altro (acciaio) | 2               | 0,32      |
| TOTALE          | 100             | 15,99     |

Tabella 5 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del Modello A - PV Si

| MATERIALE         | VALORE [kgCO <sub>2</sub> eq] | PROVENIENZA DATO                                                    |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Silicio (Mono-Si) | 193                           | SimaPro                                                             |
| Silicio (Poli-Si) | 152                           |                                                                     |
| EVA               | 4,09 ± 1,55                   | Media fra valori estratti dal database ICE e dal database ÖKOBAUDAT |
| Vetro             | 1,39 ± 0,05                   |                                                                     |
| Alluminio         | 11,86 ± 1,24                  |                                                                     |
| Altro (acciaio)   | 2,79 ± 0,18                   |                                                                     |

**Modello B- Tellururo di cadmio**

Per l’analisi del sistema al tellururo di cadmio è stato condotto un confronto fra dati presenti in letteratura e in report tecnici.

I criteri utilizzati per la selezione dei casi sono stati:

- che la FU fosse di 1 m<sup>2</sup>;
- che la somma dei principali materiali costituenti individuati ricoprisse almeno il 95% del peso totale.

Come esposto nella *Tabella 6*:

- il caso 1 è stato estrapolato dalla letteratura e riporta i dati del Life Cycle Inventory (LCI) per la tecnologia a film sottile di tellururo di cadmio (CdTe) utilizzando i dati di produzione del 2005 provenienti dagli impianti di First Solar a Perrysburg, negli Stati Uniti, e da quelli del 2008 a Frankfurt-Oder, in Germania;
- il caso 2 è un inventario presente all’interno di un report tecnico dell’International Energy Agency, riferito ad un pannello laminato fotovoltaico realizzato con tellururo di cadmio (CdTe).

Nella *Tabella 7* è riportato l’inventario con le percentuali legate ai principali materiali costituenti del modello tipo, individuata grazie all’analisi e alla media dei valori dei casi studio selezionati.

Tramite la media fra i pesi al m<sup>2</sup> dei casi selezionati si è ottenuto il peso medio del “modello tipo” per l’unità funzionale e i relativi pesi parziali dei materiali costituenti.

Gli impatti dei materiali costituenti sono stati contabilizzati mediante l'utilizzo dei coefficienti di emissione specifica di riportati in *Tabella 8*.

Tabella 6 - Casi studio e relative fonti del Modello B - PV-CdTe

| FONTE  |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASO 1 | Letteratura    | Fthenakis, V., Raugei, M. (2017). Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems.                                                                                                                                                                                               |
| CASO 2 | Report tecnico | Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., & Stucki, M. (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). |

Tabella 7 - LCI del Modello B - PV-CdTe

| MATERIALE       | PERCENTUALE [%] | PESO [kg/m²] |
|-----------------|-----------------|--------------|
| Vetro           | 97,3            | 21,94        |
| Altro (acciaio) | 2,7             | 0,60         |
| TOTALE          | 100             | 22,54        |

Tabella 8 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del Modello B - PV-CdTe

| MATERIALE       | VALORE [kgCO <sub>2</sub> eq] | PROVENIENZA DATO                                                    |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Vetro           | 1,39 ± 0,05                   | Media fra valori estratti dal database ICE e dal database ÖKOBAUDAT |
| Altro (acciaio) | 2,79 ± 0,18                   |                                                                     |

Procedura di calcolo

Per la quantificazione degli impatti è stato adottato il metodo Base per key materials [vedi *Figura 5*] .  
Si mostrano di seguito le fasi condotte per il calcolo delle emissioni e le assunzioni applicate:

- STEP 1 - In questa fase sono state calcolate le missioni della fase A1. Il peso dei materiali è stato moltiplicato per il relativo coefficiente di emissione specifica [vedi *Tabella 5* e *Tabella 8*];
- STEP 2 - in questa fase sono state determinate le emissioni relative alle fasi B2, B3, B4 in base alla necessità di operazioni di sostituzione e/o manutenzione. Questa fase è stata contabilizzata mediante l'applicazione di un fattore cautelativo del 5% applicato alla fase A1;
- STEP 3 - in questa fase la somma dei valori degli step 1 e 2 è stata moltiplicata per un fattore di scala pari a 1,6 per tener conto della complessità del prodotto in analisi;
- STEP 4 - in questa fase è stato utilizzato un buffer cautelativo pari a 1,3 al fine di tener conto della semplicità dell'approccio di calcolo svolto.

Lo step 5 non è stato applicato nel calcolo in virtù dell'assenza nei sistemi in analisi di un refrigerante.

Modello A – Silicio

Il coefficiente di emissione specifica del silicio varia in base al tipo di silicio e ai processi di produzione. Infatti, il silicio monocristallino viene prodotto con un processo più complesso e ad alta intensità energetica rispetto al silicio policristallino, che invece è prodotto con un processo meno intensivo.

Sulla base del modello tipo si è quindi condotta la medesima procedura di calcolo utilizzando due differenti coefficienti di emissione specifica, rispettivamente quello del silicio mono cristallino e poli cristallino [vedi *Tabella 5*].

Come mostrato nell'Equazione 1, è stato individuato un fattore di conversione pari a 1,3 al fine di semplificare le procedure di calcolo: il progettista potrà utilizzare questo fattore come divisore per il passaggio dalla tecnologia monocristallino e quella policristallina.

Equazione 1 - Conversione delle emissioni da 1m² di pannello PV-MonoSi a 1m² di pannello PV-PoliSi

$$WLC_{Poli-Si} = \frac{WLC_{Mono-Si}}{1,3} [kgCO_2eq]$$

Nella *Tabella 9* sono esposti i risultati degli step condotti per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq riferiti al pannello mono-cristallino. L'EC risultante per l'unità tipo di PV Mono-Si è di 488,85 kgCO<sub>2</sub>eq.

Tabella 9 - Calcolo WLC del modello tipo di pannello PV Mono-Si

| MATERIALE       | STEP 1        | STEP 2       | STEP 3        | STEP4         |
|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
|                 | [kgCO2eq]     | [kgCO2eq]    | [kgCO2eq]     | [kgCO2eq]     |
| Silicio         | 186,43        | 9,32         |               |               |
| EVA             | 4,51          | 0,23         |               |               |
| Vetro           | 17,10         | 0,86         |               |               |
| Alluminio       | 14,90         | 0,74         |               |               |
| Altro (acciaio) | 0,89          | 0,04         |               |               |
|                 | <b>223,83</b> | <b>11,19</b> | <b>376,04</b> | <b>488,85</b> |

Modello B- Tellururo di cadmio

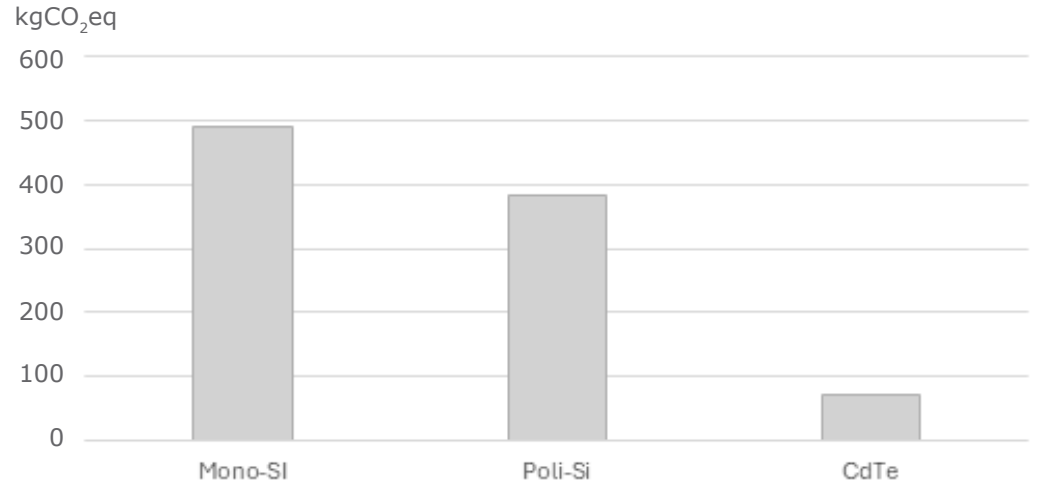
Nella *Tabella 10* sono esposti i risultati degli step condotti per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq riferiti al Pannello al tellururo di cadmio. L'EC risultante per l'unità tipo di PV CdTe è di 70,03 kgCO<sub>2</sub>eq.

Tabella 10 - Calcolo WLC del modello tipo di pannello PV CdTe

| MATERIALE       | STEP 1                 | STEP 2                 | STEP 3                 | STEP 4                 |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                 | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] |
| Vetro           | 30,38                  | 1,52                   |                        |                        |
| Altro (acciaio) | 1,68                   | 0,08                   |                        |                        |
|                 | <b>32,06</b>           | <b>1,6</b>             | <b>53,87</b>           | <b>70,03</b>           |

Nel *Grafico 1* è presentato un confronto fra le tre tecnologie analizzate. Dallo studio si evince che, nell'ambito EC, i pannelli al tellururo di cadmio sono meno impattanti sull'ambiente, al contrario di quelli al silicio mono-cristallino che presentano le emissioni maggiori.

Grafico 1 - Emissioni del ciclo di vita di un pannello PV Mono-Si di 1 m<sup>2</sup>, di un pannello PV Poli-Si di 1 m<sup>2</sup> e di un pannello PV CdTe di 1 m<sup>2</sup>



Il Ministero dell'ambiente, nell'Appendice 2 del documento *Method for the whole life carbon assessment of buildings* (Ministry of the Environment, 2019) espone i "Dati sulle emissioni dei sistemi impiantistici edilizi" riferite al contesto nazionale finlandese. In *Tabella 11* si espongono i valori di CO<sub>2</sub>eq per i pannelli solari al silicio cristallino (Mono-Si e Poli-Si) e per quelli a film sottile stimati nel presente studio di tesi a confronto con quelli registrati per il territorio finlandese per i medesimi impianti. Come si può osservare i pannelli a film sottile presentano valori allineati, al contrario dei pannelli al Silicio cristallino, per i quali il valore stimato nella tesi risulta più elevato rispetto a quello finlandese. La differenza fra le due valutazioni riferite alla tecnologia al silicio potrebbe essere implicabile ai coefficienti di emissione specifica utilizzati in riferimento al materiale "Silicio".

Tabella 11 - Valori di CO<sub>2</sub>eq per Pannelli solari al Silicio cristallino e a film sottile stimati nella tesi e osservati per il territorio finlandese

|              | Pannello solare in Silicio cristallino [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> *] | Pannello solare a film sottile [kgCO <sub>2</sub> eq/ m <sup>2</sup> *] |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Modello tesi | 375,38-488,85                                                                  | 70,03                                                                   |
| Finlandia    | 242,00                                                                         | 67,00                                                                   |

\*superficie indicata per ciascun collettore solare

4.4.2 Sistemi solari termici

I sistemi solari termici rappresentano una soluzione tecnologica avanzata per la produzione di calore mediante lo sfruttamento dell’energia solare: questa viene convertita direttamente in energia termica producendo acqua o agenti riscaldanti ad alte temperature che vengono impiegati in processi industriali, centrali solari, edifici residenziali, commerciali e per uffici.

Un impianto solare termico è essenzialmente costituito dai seguenti elementi:

- un collettore solare termico (o pannello) - un sistema di captazione e trasformazione dell’energia che assorbe la radiazione solare e la trasforma direttamente in energia termica, trasferendo il calore accumulato ad un fluido termovettore;
- un sistema di accumulo - costituito da un serbatoio contenente il fluido da utilizzare, con le funzioni principali di ridurre la variabilità dell’energia incidente e rimediare allo sfasamento temporale tra disponibilità e fabbisogno;
- un circuito idraulico - che collega i collettori e l’accumulo con adeguato sistema di regolazione e di circolazione del fluido; essendo quest’ultimo quasi sempre diverso dal fluido utilizzato dall’utente, deve essere previsto uno scambiatore di calore;
- un sistema di integrazione - costituito da un generatore (ad esempio una caldaia o una pompa di calore) che consenta di sopperire ai periodi di minore insolazione e conseguente minore produzione energetica da parte del sistema di captazione.

Criteri per la contabilizzazione

L’obiettivo del calcolo è stato la quantificazione dell’EC di un’unità tipo di un sistema solare termico. Con “unità tipo” si intende un elemento rappresentativo della tipologia di pannello, ottenuto mediante confronto e interpolazione dei dati afferenti a diversi pannelli, in funzione della specifica tecnologia della cella.

Nonostante tali sistemi necessitino, oltre alla centrale, di altri componenti, l’analisi si è concentrata unicamente sulla quantificazione degli impatti ambientali relativi all’elemento “pannello”.

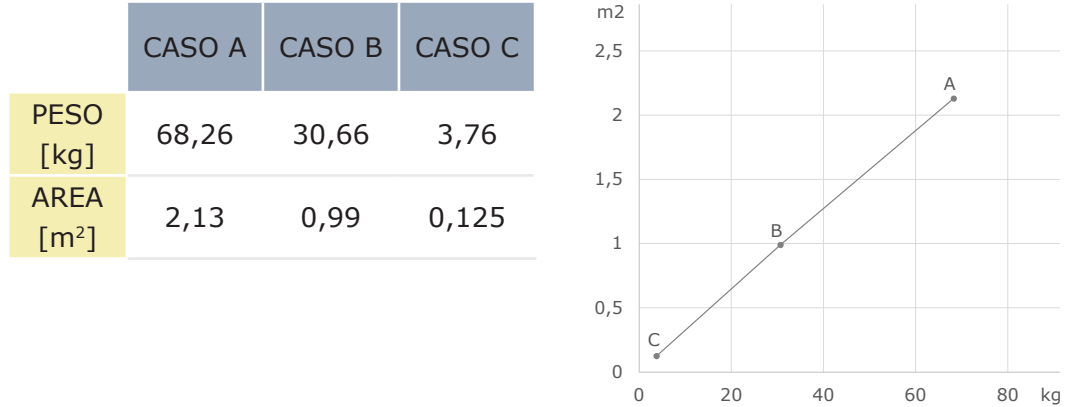
È stato identificato un modello standard di collettore solare termico (CST), mediante un confronto fra casi studio oggetto di analisi LCA rintracciati in letteratura.

Attraverso l’indagine statistica mostrata in Figura 7 è stata riscontrata una correlazione tra il peso del CST e la sua superficie.

Analogamente a quanto illustrato per i pannelli PV, anche lo studio WLC del pannello solare termico si basa su una FU di 1 m² di superficie.

L’analisi statistica presentata di seguito risulta limitata, a causa della scarsità di dati che compongono il dataset. Di conseguenza, si propone l’applicazione di un sistema “aperto”, in cui il caricamento di nuovi dati può arricchire e popolare il modello elaborato, consentendo di affinare la qualità del risultato finale.

Figura 7 - Analisi statistica per comprendere la relazione tra Peso e Area dei pannelli



L’analisi condotta comprende tutte le fasi e i relativi moduli del ciclo di vita del pannello, in particolare:

- A – Produzione e costruzione;
- B – Uso;
- C – Fine vita.

È stato adottato il metodo di calcolo BASE per key materials [vedi Tabella 5].

La determinazione degli impatti dei materiali costituenti è stata condotta mediante l’utilizzo di coefficienti di emissione specifica ottenuti tramite una media fra valori provenienti da differenti database (ICE, ÖKOBAUDAT).

Si è ipotizzato una durata media di vita utile di 15 anni.

Come per il caso PV l’analisi non tiene in considerazione la possibilità di danneggiamento del pannello a causa di eventi rari (come la rottura del vetro). I documenti di riferimento indicano che durante il periodo di vita di 15 anni il pannello necessita di alcuni cicli di manutenzione ordinaria. Nel calcolo è stato utilizzato un fattore cautelativo, al fine di tenere in considerazione eventuali operazioni di manutenzione e/o sostituzione.

Inventario

Come mostrato nella Tabella 12 sono stati individuati in letteratura 3 casi studio oggetto di LCA dai quali è stato possibile ricostruire la composizione materica.

Nella Tabella 13 è riportato l’inventario con le percentuali legate ai

principali materiali costituenti del modello tipo, individuata grazie all’analisi e alla media dei valori dei casi studio selezionati. Tramite la media fra i pesi al m<sup>2</sup> dei casi selezionati si è ottenuto il peso medio del “modello tipo” per l’unità funzionale e i relativi pesi parziali dei materiali costituenti. Gli impatti dei materiali costituenti sono stati contabilizzati mediante l’utilizzo dei coefficienti di emissione specifica riportati nella *Tabella 14*.

Tabella 12 - Casi studio e relative fonti del modello di CST

|        | FONTE       |                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASO 1 | Letteratura | Ardente, F., Beccali, G., Cellura, M., Lo Brano, V. (2004). Life cycle assessment of a solar thermal collector                                                                                                               |
| CASO 2 | Letteratura | Soulio Souliotis, M., Arnaoutakis, N., Panaras, G., Kavga, A., & Papaefthimiou, S. (2018). Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications. |
| CASO 3 | Letteratura | Lupu, A., Sallah, M., Belecciu, C., & Popescu, A. (2022). Life cycle analyses for solar thermal collectors.                                                                                                                  |

Tabella 13 - LCI del modello di CST

| MATERIALE            | PERCENTUALE [%] | PESO [kg/m <sup>2</sup> ] |
|----------------------|-----------------|---------------------------|
| Alluminio            | 8,57            | 2,61                      |
| Rame                 | 15,81           | 4,82                      |
| Acciaio galvanizzato | 35,32           | 10,77                     |
| Vetro                | 23,62           | 7,20                      |
| Poliuretano          | 4,23            | 1,29                      |
| Acciaio inossidabile | 8,44            | 2,57                      |
| Altro (acciaio)      | 4,01            | 1,22                      |
| Totale               | 100             | 30,5                      |

Tabella 14 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del modello di CST

| MATERIALE            | VALORE [kgCO <sub>2</sub> eq/kg] | PROVENIENZA DATO                                                    |
|----------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Alluminio            | 11,86 ± 1,24                     | Media fra valori estratti dal Database ICE e dal Database ÖKOBAUDAT |
| Rame                 | 2,55 ± 1,26                      |                                                                     |
| Acciaio galvanizzato | 2,66 ± 0,32                      |                                                                     |
| Vetro                | 1,39 ± 0,05                      |                                                                     |
| Poliuretano          | 4,41 ± 0,13                      |                                                                     |
| Acciaio inossidabile | 4,03 ± 0,41                      |                                                                     |
| Altro (acciaio)      | 2,79 ± 0,18                      |                                                                     |

Procedura di calcolo

Si mostrano di seguito le fasi condotte per il calcolo delle emissioni e i relativi risultati:

- STEP 1 - calcolo delle emissioni della fase A1  
In questa fase il peso dei materiali è stato moltiplicato per il relativo coefficiente di emissione specifica [vedi *Tabella 15*];
- STEP 2 - in questa fase sono state determinate le emissioni relative alle fasi B2, B3, B4 in base alla necessità di operazioni di sostituzione e/o manutenzione. Questa fase è stata contabilizzata mediante l’applicazione di un fattore cautelativo del 5% applicato alla fase A1;
- STEP 3 - in questa fase la somma dei valori degli step 1 e 2 è stata moltiplicata per un fattore di scala pari a 1,6 per tener conto della complessità del prodotto in analisi;
- STEP 4 - in questa fase è stato utilizzato un buffer cautelativo pari a 1,3 al fine di tener conto della semplicità dell’approccio di calcolo svolto.

Lo step 5 non è stato applicato nel calcolo in virtù dell’assenza nei sistemi in analisi di un refrigerante.

Nella *Tabella 15* sono esposti i risultati degli step condotti per il calcolo



delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq riferiti al collettore solare termico.  
L'EC risultante per l'unità tipo di CST è di 221,38 kgCO<sub>2</sub>eq.

Tabella 15 - LCI del modello di CST

| MATERIALE            | STEP 1 | STEP 2 | STEP 3 | STEP 4 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Alluminio            | 30,98  | 1,55   |        |        |
| Rame                 | 12,31  | 0,62   |        |        |
| Acciaio galvanizzato | 28,60  | 1,43   |        |        |
| Vetro                | 9,98   | 0,50   |        |        |
| Poliuretano          | 5,70   | 0,28   |        |        |
| Acciaio inossidabile | 10,37  | 0,52   |        |        |
| Altro (acciaio)      | 3,42   | 0,17   |        |        |
| Totale               | 101,36 | 5,07   | 170,29 | 221,38 |

4.5 CONTABILIZZAZIONE EC DEI MEP PER IL TRASPORTO DI PERSONE E MERCI ALL'INTERNO DEGLI EDIFICI

I MEP per il trasporto di persone e merci all'interno degli edifici sono sistemi fondamentali per garantire la funzionalità, l'accessibilità e l'efficienza operativa dei manufatti edilizi. Fanno parte di questa categoria diversi tipi di sistemi, fra i quali:

- Ascensori;
- Montacarichi;
- Scale mobili;
- Tapis roulant;
- Sistemi di Trasporto Pneumatico o a Nastro per Merci;
- Sistemi di Trasporto Verticale per Parcheggi (Piattaforme per Auto);
- Sistemi di Smaltimento e Trasporto dei Rifiuti;
- Servoscale o Montascale;
- Sistemi di Trasporto Automatizzati;
- Piattaforme Elevatrici.

4.5.1 Ascensori

Gli ascensori svolgono un ruolo fondamentale per migliorare l'accessibilità degli ambienti, soprattutto in edifici multipiano, e sono soggetti a normative di sicurezza ed efficienza energetica specifiche.  
In Italia, l'obbligo di installazione di ascensori in edifici è regolato da una serie di leggi e norme tecniche che variano a seconda del tipo di edificio, della sua altezza e del numero di piani.

La funzione principale degli ascensori è trasportare passeggeri o merci tra i vari piani di un edificio, fino al piano di destinazione impostato dall'utente.

Un ascensore è composto principalmente da:

- un sistema di trazione, che fornisce il movimento verticale della cabina dell'ascensore
- un sistema di guida, che stabilizza e guida la cabina durante il movimento verticale all'interno del vano dell'ascensore, prevenendo oscillazioni o deviazioni laterali;
- una cabina, ossia lo spazio in cui viaggiano i passeggeri o le merci e che deve garantire comfort, sicurezza e accessibilità per tutti gli utenti;
- un sistema di porte, che regola l'accesso sicuro alla cabina dell'ascensore;
- un sistema di compensazione del peso, che bilancia il peso della cabina e del carico per ridurre lo sforzo necessario al motore;

- un sistema di azionamento elettrico, che controlla il motore dell'ascensore, regolandone la velocità, il movimento e la posizione esatta durante il funzionamento.
- un sistema di controllo elettronico, che gestisce tutte le operazioni dell'ascensore, (dalla chiamata dei piani alla gestione del movimento e delle porte);
- un sistema di protezione di sicurezza, che garantisce che l'ascensore funzioni in modo sicuro e si arresti immediatamente in caso di emergenza o malfunzionamento.

## Criteri per la contabilizzazione

L'obiettivo è stato quello di impostare una procedura parametrizzata per il calcolo dell'EC di un modello tipo di ascensore, così che il progettista possa determinare l'impatto del proprio progetto conoscendo unicamente alcuni elementi progettuali di base come l'altezza massima di viaggio, la capacità nominale che è in grado di sollevare e il numero di piani che serve.

L'analisi condotta comprende tutte le fasi e i relativi moduli del ciclo di vita, in particolare:

- A – Produzione e Costruzione;
- B – Uso;
- C – Fine vita.

La procedura di calcolo utilizzata è il "metodo di calcolo BASE per key materials" [vedi *Figura 5*].

La determinazione degli impatti dei materiali costituenti è stata condotta mediante l'utilizzo di coefficienti di emissione specifica ottenuti tramite una media fra valori provenienti da differenti database (ICE e ÖKOBAUDAT) o presenti in letteratura.

La vita utile individuata è di 25 anni, moda delle vite utili degli ascensori presi in considerazione; la durata effettiva dipende principalmente dalla frequenza della manutenzione, dalla sostituzione dei componenti e dalle condizioni d'uso (ad esempio, per ascensori con un massimo di 200.000 avviamenti all'anno, le funi devono essere sostituite ogni 8 anni).

## Inventario

Al fine di determinare i materiali costituenti dei sistemi di ascensori, le informazioni necessarie sono state rintracciate tramite una revisione

della letteratura e una selezione di Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD).

In particolare, si è costituito un dataset di 45 casi: 1 proveniente da paper scientifici, 43 da EPD e 1 da report tecnico.

I criteri utilizzati per la selezione dei casi sono stati:

- che la FU fosse "un sistema";
- che la somma dei principali materiali costituenti individuati ricoprisse almeno il 95% del peso totale;
- Che il sistema preso in analisi fosse elettrico;
- Che si trattasse di nuovi impianti e non di interventi su sistemi esistenti.

Come esposto nella *Tabella 16*:

- il caso 1 è stato estrapolato dalla letteratura e rappresenta l'LCI di un ascensore prodotto dalla T Elevator Company;
- i casi 2-16 sono estrapolati da Dichiarazioni ambientali di prodotto Type III (EPD) messi a disposizione dalla azienda Kone; (R. Frischknecht, 2020);
- i casi 17-27 sono estrapolati da Dichiarazioni ambientali di prodotto Type III (EPD) relativi ai prodotti dell'azienda Otis;
- il caso 29 è un caso inserito nel "Sustainability report" pubblicato da TKElevator nel 2024, in cui sono documentati i materiali utilizzati nei prodotti TK Elevator nel 2022/23 e il loro peso relativo (espresso in %); I materiali utilizzati durante l'anno in esame sono stati stimati sulla base degli inventari disponibili per le EPD o per le analisi LCA dei prodotti di TK Elevator. Trattandosi di un "inventario" cumulativo di vari sistemi di ascensore, il caso studio è stato preso in considerazione solo per l'inventario dei materiali funzionale alla definizione di un modello tipo; è stato invece escluso dallo studio per la determinazione del peso degli ascensori perché nel report non erano presenti dati relativi ai pesi dei singoli sistemi presi in analisi;
- i casi 30-32 sono tre casi presenti all'interno di due Dichiarazioni ambientali di prodotto Type III (EPD) relativi a prodotti dell'azienda Orona. I casi studio sono stati presi in considerazione solo per l'inventario dei materiali; sono stati esclusi dallo studio per la determinazione del peso degli ascensori perché i documenti di riferimento non fornivano informazione circa la massa dei sistemi;
- i casi 33-45 sono estrapolati da Dichiarazioni ambientali di prodotto

Type III (EPD) messi a disposizione dalla azienda Schindler.

Tabella 16 - Casi studio, relative fonti e ambito di applicazione utilizzati per il modello tipo di ascensore

|            |                | FONTE                                                                                                                                                           | Studio LCI* | Studio W** |
|------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| CASO 1     | Letteratura    | Dong, Y., Liang, C., Guo, L., Cai, X., & Hu, W. (2023). Life cycle carbon dioxide emissions and sensitivity analysis of elevators. Sustainability, 15(1), 1-15. | Si          | Si         |
| CASO 2-16  | EPD            | KONE Corporation. (n.d.). Life cycle impact assessments. KONE.                                                                                                  | Si          | Si         |
| CASO 17-27 | EPD            | Otis. (n.d.). Environmental product declarations . Retrieved October 8, 2024                                                                                    | Si          | Si         |
| CASO 28    | Report tecnico | TK Elevator. (n.d.). Sustainable products and services. Retrieved October 8, 2024                                                                               | Si          | No         |
| CASO 29-41 | EPD            | Orona Group. (2021). EPD Orona Next Smart Lift (PDF). Orona Group. Retrieved October 8, 2024                                                                    | Si          | No         |
| CASO 33-45 | EPD            | Schindler Group. (n.d.). Product sustainability. Schindler Group. Retrieved October 8, 2024                                                                     | Si          | Si         |

Studio LCI\*= analisi per la determinazione dell’inventario del modello  
Studio W\*\*= analisi per la determinazione del peso del “sistema-ascensore”

Nella *Tabella 17* è riportato l’inventario con le percentuali dei principali materiali costituenti del modello tipo, individuata grazie all’analisi e alle media dei valori dei casi studio selezionati.  
Nel modello sono stati considerati solo i materiali la cui media costituisce almeno l’1% del peso; le incidenze percentuali di “organic material”, “lubrificant and adhesive” e “battera” (<1%) sono state incluse nella categoria “altro”.

Tabella 17 - LCI del modello tipo di ascensore

| MATERIALE                                  | PERCENTUALE [%] |
|--------------------------------------------|-----------------|
| Materiale ferroso                          | 82,04           |
| Materiale inorganico                       | 12,30           |
| Apparecchiature elettroniche ed elettriche | 1,06            |
| Plastica e gomma                           | 1,67            |
| Materiale non ferroso                      | 1,92            |
| Altro (acciaio)                            | 1,01            |
| TOTALE                                     | 100             |

Per la definizione del peso del sistema ascensore si è costruito un modello di regressione lineare [vedi *Appendice*]; è stato utilizzato il medesimo dataset tenuto in considerazione per l’LCI epurato dai casi per cui non si era a conoscenza della massa del sistema.  
L’analisi ha evidenziato una relazione tra il Peso dell’ascensore (W), la Travelled height (H), il Related load (R) e il Floor number (F) che è stata espressa nell’*Equazione 2*.

Equazione 2 - Relazione tra Peso (W), Travelled height (H), Related Load (R) e Floor number (F) di un ascensore

$$W \text{ [kg]} = \exp [ 7,326 + (H*3,55E-2)+(F* - 5,13E-2) + (R*6,63E-4) - (H*F*-2,53E-4)+(H*R*-1,48E-5) + (F*R*5,88E-5)]$$

Gli impatti dei materiali costituenti possono essere contabilizzati mediante l’utilizzo dei coefficienti di emissione specifica riportati nella *Tabella 18*.

Tabella 18 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali del modello tipo di ascensore

| MATERIALE            | VALORE [kgCO2eq] | PROVENIENZA DATO                                                    |
|----------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Materiale ferroso    | 2,64             | Media fra valori estratti dal database ICE e dal database ÖKOBAUDAT |
| Materiale inorganico | 1,09             |                                                                     |

|                                            |      |                                                                     |
|--------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------|
| Apparecchiature elettroniche ed elettriche | 80   | Media fra valori estratti dal database ICE e dal database ÖKOBAUDAT |
| Plastica e gomma                           | 3,44 |                                                                     |
| Materiale non ferroso                      | 6,29 |                                                                     |
| Altro (acciaio)                            | 3,19 |                                                                     |

Procedura di calcolo

Per la quantificazione degli impatti è stato adottato il metodo Base per key materials [Tabella 5].  
Si mostrano di seguito le fasi da condurre per il calcolo delle emissioni (in seguito alla determinazione del peso W tramite Equazione 1) e le assunzioni da applicare:

- STEP 1: calcolo delle emissioni della fase A1  
In questa fase il peso dei materiali deve essere moltiplicato per il relativo coefficiente di emissione specifica [vedi Tabella 18];
- STEP 2: in questa fase vengono determinate le emissioni relative alle fasi B2, B3, B4 in base alla necessità di operazioni di sostituzione e/o manutenzione. (Per tener conto delle operazioni di manutenzione e/o sostituzione questa fase è da contabilizzare mediante l’applicazione di un fattore cautelativo del 10% alla fase A1);
- STEP 3: in questa fase la somma dei valori degli step 1 e 2 deve essere moltiplicata per un fattore di scala pari a 1,6 per tener conto della complessità del prodotto in analisi;
- STEP 4: in questa fase si deve utilizzare un buffer cautelativo pari a 1,3 al fine di tener conto della semplicità dell’approccio di calcolo svolto.

Lo step 5 non è stato applicato nel calcolo in virtù dell’assenza nei sistemi in analisi di un refrigerante.

Nella Tabella 19 sono esposti i calcoli degli step da condurre per la determinazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq e i risultati per un modello con un W=4.396,91 kg (risultato di H=22,43 m, R=900 kg e F= 7).

Tabella 19 - Calcolo WLC del modello tipo di ascensore per un peso di 4.396,9 kg

|                                            | STEP1                  | STEP 2                 | STEP 3                 | STEP 4                 |
|--------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                            | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] | [kgCO <sub>2</sub> eq] |
|                                            |                        | Step1*0,1              | (Step1+Step2)*1,6      | Step3*1,3              |
| Materiale ferroso                          | 9522,03                | 952,20                 |                        |                        |
| Materiale inorganico                       | 592,12                 | 59,21                  |                        |                        |
| Apparecchiature elettroniche ed elettriche | 3736,22                | 373,62                 |                        |                        |
| Plastica e gomma                           | 252,67                 | 25,27                  |                        |                        |
| Materiale non ferroso                      | 531,95                 | 53,20                  |                        |                        |
| Altro (acciaio)                            | 141,15                 | 14,11                  |                        |                        |
| TOTALE                                     | 13.776                 | 1,478                  | 26.006                 | 33.808                 |

# PARTE III

---

## 5. IL CASO STUDIO: Nuovo centro direzionale “CRIF21” di Bologna



## 5.1 DESCRIZIONE

- Luogo: Bologna
- Cronologia progetto: da 2018 a 2019
- Cronologia realizzazione: da 2020 a 2023
- Lotto: 6.000 m<sup>2</sup>
- Importo dei lavori: 60 milioni di euro
- Committente: Crif
- Progettisti: Politecnica Ingegneria e Architettura
- Categoria di intervento: Uffici
- Certificazioni: LEED BD+C v4 Platinum
- Classe energetica: A4



Figura 8 - Nuova sede CRIF, Via della Beverara 21/23

Nella sezione *Allegati* (p. 148) si riporta un estratto degli elaborati di progetto forniti dalla società Politecnica.

## LO STUDIO DI PROGETTAZIONE: Politecnica

Politecnica è una società italiana di progettazione integrata (architettura, ingegneria e urbanistica) fondata nel 1972. La società è presente in Italia con 4 sedi (Modena, Milano, Firenze, Catania) e in 9 Paesi esteri (Belize, Croazia, Danimarca, Guyana, Kenya, Malta, Romania, Sierra Leone, Turchia) (modulo.net, 2025).

### Il progetto

CRIF è una azienda globale fondata nel 1988 a Bologna che opera nel settore delle informazioni creditizie, dell'analisi dei dati e dei servizi di business information.

Nel 2018 la società ha incaricato Politecnica della progettazione e del conseguente coordinamento dei lavori per la realizzazione del nuovo centro direzionale.

L'edificio, denominato "CRIF21", sorge nella zona di Lama a Bologna, presso Via della Beverara al civico 21/23, in un lotto di terreno abbandonato, precedentemente occupato da un manufatto ad uso produttivo.

Il vecchio sito è stato riconvertito in uno spazio moderno, grazie alla riqualificazione dell'area e alla realizzazione di un ambiente di lavoro confortevole per i suoi fruitori (Politecnica, 2025).

I progettisti hanno cercato di considerare, in fase di progettazione, anche temi ambientali, energetici e climatici, nonché considerazioni sull'economia circolare.

L'edificio si sviluppa su 6 piani fuori terra e 2 interrati, con una superficie di oltre 20.000 metri quadrati. Il primo e il secondo piano interrato (L-2, L-1) ospitano i parcheggi e una parte dei locali tecnici, il piano terra (L0) accoglie la hall d'ingresso e l'auditorium, mentre nei piani superiori (L1, L2, L3, L4) sono dislocati la maggior parte degli ambienti lavorativi (uffici, open space, sale conferenza, aree relax); il quinto piano (L5) ospita la sala del consiglio mentre gli ultimi livelli (L6, L7) sono dedicati ai locali tecnici e all'impianto fotovoltaico.

### Tipologia costruttiva

La struttura portante è realizzata in calcestruzzo armato mentre per gli altri elementi dell'edificio sono state adottate soluzioni con tecnica costruttiva a secco.

In generale, sia le soluzioni a secco che quelle a umido adottate nel progetto sono tecnologicamente compatibili con sistemi di trattamento finalizzati al riutilizzo dei componenti a fine vita.

Nel progetto sono stati impiegati prodotti dotati di EPD e elementi costituiti da una percentuale di materiale riciclato (fattori che hanno

consentito il conseguimento di punti leed).

Infine, quasi il 90% dei rifiuti prodotti in fase di preparazione del sito e costruzione sono stati indirizzati a impianti di riciclo (ottenendo altri punti Leed per la gestione dei rifiuti dalle attività di cantiere). (Mezzi, s.d.)

### Comfort termico

La conformazione dell'edificio, caratterizzata da una grande corte verde centrale, incide positivamente sul raffrescamento dell'ambiente circostante, diminuendone nel periodo estivo la temperatura e l'umidità. La riduzione dell'isola di calore urbano è inoltre favorita dai materiali che costituiscono le pavimentazioni esterne, in virtù del loro indice di riflessione solare.

In fase di progettazione vi è stata una particolare attenzione per lo studio dell'ombreggiamento, con la determinazione di un sistema di logge e di schermature mobili esterne. All'utente, sui fronti ovest e sud, è anche consentito di modificare la posizione dei tendaggi integrati alla facciata. Grazie ad accorgimenti sulle geometrie dell'involucro, sugli infissi prestazionali, sulle lastre di gres che fungono da facciata ventilata e sull'utilizzo di sistemi radianti interni, le temperature delle superfici interne e la ridotta velocità dell'aria primaria in ambiente prevengono condizioni di discomfort interno e hanno permesso di raggiungere il credito Leed "Thermal comfort". (Mezzi, s.d.)

### Comfort acustico

Il comfort acustico è garantito da diversi elementi quali la disposizione planivolumetrica dell'edificio nei confronti delle sorgenti di rumore presenti nell'area e la tipologia edilizia; la struttura a corte, aperta verso il parco e chiusa verso la strada permette la protezione delle aree interne, evitando il riverbero del rumore.

Il layout interno è sviluppato orientando gli ambienti meno sensibili (come ingresso, foyer e openspace) sul fronte più esposto al rumore, mentre i locali che richiedono maggior silenzio sono collocati sui lati più protetti dell'edificio.

Inoltre, i servizi rumorosi (quali ascensori, bagni e vano scale) sono stati posizionati nella zona centrale e intorno ad essi sono stati inseriti spazi connettivi (con l'obiettivo di separarli da quelli lavativi).

Fra gli ambienti sono state inserite pareti divisorie a secco con isolante interposto al fine di garantirne il rispettivo fonoisolamento e i pavimenti sono stati sopraelevati su piedini, con inserimento di "pad" acustico per limitare il rumore al calpestio; inoltre, negli ambienti che prevedono la permanenza di persone sono stati impiegati sistemi fonoassorbenti a soffitto.

Per minimizzare ulteriormente il rumore negli ambienti gli impianti per la produzione dei fluidi termovettori e per il trattamento dell'aria sono stati

dislocati per la maggior parte in copertura. (Mezzi, s.d.)

### Risorse energetiche

Le scelte progettuali legate alla relazione edificio/impianto sono state tutte orientate verso la massimizzazione del risparmio energetico.

Nell'edificio è stata prevista l'adozione del "full electric" e sono stati integrati sistemi di produzione di energia rinnovabile in loco.

I sistemi di "building automation" consentono inoltre di controllare e ottimizzare le performance dell'edificio.

L'insieme di queste strategie ha permesso il raggiungimento della classe energetica A4 e di ottenere la Certificazione LEED Platinum (Politecnica, 2025).

### Impianti meccanici e produzione di energia rinnovabile.

Sopra la copertura dell'edificio è stata installata una pergola fotovoltaica per la produzione in loco di energia elettrica da fonti rinnovabili; questa disposizione ha consentito da un lato di massimizzare la superficie di esposizione dei pannelli e dall'altro di ridurre l'impatto visivo degli impianti dislocati in copertura. (Manferdini, 2024)

Fondamentali nel raggiungimento dell'obiettivo di utilizzare energia da fonti rinnovabili al 100% sono state le pompe di calore elettriche polivalenti.

Per la climatizzazione, all'interno dell'edificio, sono stati utilizzati pannelli radianti metallici, che oltre a consentire libertà progettuale offrono una modalità di scambio termico di tipo statico (quindi silenzioso). La modalità di climatizzazione appena descritta si integra molto bene anche con la generazione a pompa di calore. A completamento dell'impianto radiante, sono stati inseriti nel progetto alcuni fan coil incassati nel pavimento, al fine di raggiungere rapidamente la temperatura desiderata in tutti gli ambienti e gestire i picchi estivi. Per alcune aree specifiche, come l'auditorium e la sala CDA, è invece stato scelto un impianto a tutta aria. (Manferdini, 2024)

### Illuminazione

L'involucro dell'edificio consente di sfruttare al meglio le potenzialità delle fonti di luce naturale per l'illuminazione degli ambienti. Inoltre, la presenza di sistemi di dimmerazione che gestiscono automaticamente l'intensità luminosa dei corpi illuminanti artificiali in relazione all'intensità della luce naturale proveniente dall'esterno consente una riduzione dei consumi energetici. Al fine di ridurre ulteriormente gli sprechi ogni ambiente è poi dotato di sensori di presenza in grado di disattivare in automatico l'illuminazione artificiale in caso di assenza di persone nell'ambiente. (Mezzi, s.d.)

## 5.2 VALUTAZIONE WLC

Il processo di valutazione delle emissioni di carbonio lungo il ciclo di vita dell'edificio oggetto di studio è stato strutturato secondo tre step sequenziali:

- 1) un primo step, durante il quale si è proceduto alla raccolta, alla selezione e alla gestione dei dati relativi al caso studio;
- 2) un secondo step, nel quale è stato svolto il vero e proprio calcolo WLC;
- 3) un ultimo step, dedicato all'analisi del processo svolto e dei risultati ottenuti nella fase di contabilizzazione.

### 5.2.1 Confini del sistema della valutazione WLC

Di seguito vengono forniti tutti gli elementi necessari per una chiara comprensione del processo di valutazione svolto e dei risultati ottenuti.

#### Ambito di applicazione/funzione del sistema

L'oggetto di studio è l'edificio per uffici CRIF21, descritto nel *Paragrafo 5.1*.

#### Scenario temporale di riferimento (STR)

In linea con le indicazioni presenti nel framework europeo *Level(s)* (Commissione Europea, 2020), a loro volta integrate nel documento metodologico di riferimento per lo studio (Andreotti & Giordano, 2024), nel calcolo è stato considerato uno scenario temporale di riferimento (STR) del manufatto edilizio di 50 anni.

#### Confini del sistema

Nello studio sono state contabilizzate tutte e quattro le fasi incluse nei confini di sistema "dalla culla al tomba", ossia la fase di Produzione e la fase di Costruzione (A), la fase di Uso (B) e la fase di Fine Vita (C). Come mostrato in *Tabella 20*, sono stati calcolati tutti gli otto moduli considerati obbligatori all'interno del progetto *INDICATE LIFE* (A1-A3, B4, B5, B6, C3 e C4) e sette moduli opzionali (A4, A5, B2, B3, B7, C1 e C2).

#### Unità funzionale (FU)

I risultati della valutazione sono espressi in tonnellate di CO<sub>2</sub>

equivalente (tCO<sub>2</sub>eq), riferiti sia all'intero edificio sia, ove possibile, alle singole unità tecnologiche e ai materiali chiave che lo compongono. Le emissioni di CO<sub>2</sub>eq sono riportate sia in termini di Whole Life Carbon (WLC), sia suddivise per le principali fasi del ciclo di vita dell'edificio: Produzione, Costruzione, Uso e Fine vita.

Per agevolare il confronto dei risultati con altre opere edilizie o con i valori di benchmark di diversi Paesi i risultati sono espressi anche in funzione della superficie dell'edificio, utilizzando quattro diverse modalità di calcolo dell'area:

- Gross Floor Area (GFA) – superficie lorda di pavimento - include la somma di tutte le superfici dei piani dell'edificio, misurate al perimetro esterno delle pareti;
- Gross Internal Area (GIA) – superficie interna lorda - include la somma di tutte le superfici dei piani dell'edificio, misurate al perimetro interno delle pareti;
- Net Heated Area (NHA) – superficie netta riscaldata - comprende l'intera superficie effettivamente riscaldata, escludendo i muri perimetrali e interni;
- Liveable Area / Usable Area (LA/UA) – superficie utile o abitabile - rappresenta la superficie effettivamente utilizzabile dalle persone, escludendo i muri ma includendo tutti gli ambienti abitabili.

Nel caso studio, le superfici rilevate risultano essere:

- GFA: 27.500 m<sup>2</sup>;
- GIA: 20.512,5 m<sup>2</sup>;
- NHA: 10.129,4 m<sup>2</sup>;
- LA/UA: 10.440 m<sup>2</sup>.



Tabella 20 - Moduli contabilizzati nel calcolo per l'edificio "CRIF21" in relazione alle indicazioni del progetto INDICATE LIFE

| Type                            | Stages                                                     |                                                                | Modules                                | Description                                                                                                   | REPORTING                                                                           |                            |             |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|
|                                 |                                                            |                                                                |                                        |                                                                                                               | INDICATE LIFE                                                                       | CRIF21                     |             |
| Building life cycle information | A0                                                         | Pre construction                                               | A0                                     | Assessment of non-physical activities                                                                         | Optional                                                                            | NO                         |             |
|                                 | A1-A3<br><br>Product stage                                 |                                                                | Sum                                    | Product stage                                                                                                 | Mandatory                                                                           | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | A1                                     | Extraction and upstream production                                                                            | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | A2                                     | Transport to factory                                                                                          | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | A3                                     | Manufacturing                                                                                                 | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 | A4-A5<br><br>Construction stagfe                           |                                                                | A4                                     | Transport to site                                                                                             | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | A5                                     | Construction and installation process                                                                         | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 | B1-B8<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>Use stage |                                                                | B1                                     | Use                                                                                                           | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B2                                     | Maintenance                                                                                                   | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B3                                     | Repair                                                                                                        | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B4                                     | Replacement                                                                                                   | Mandatory                                                                           | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B5                                     | Refurbishment                                                                                                 | Mandatory                                                                           | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B6                                     | Sum                                                                                                           | Operational energy use                                                              | Mandatory                  | SI          |
|                                 |                                                            |                                                                | B6.1                                   | Regulated energy use of building-integrated systems (services)                                                | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B6.2                                   | Non-regulated energy use of building-integrated systems (services)                                            | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B6.3                                   | Other energy use related to building user activities                                                          | Recommended                                                                         | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B7                                     | Operational water use                                                                                         | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | B8                                     | Building related user activities not covered in B1-B7                                                         | Optional                                                                            | NO                         |             |
|                                 |                                                            |                                                                | C1-C4<br><br><br><br>End of life stage |                                                                                                               | C1                                                                                  | Deconstruction, demolition | Recommended |
|                                 | C2                                                         | Transport to waste processing or disposal                      |                                        |                                                                                                               | Recommended                                                                         | SI                         |             |
|                                 | C3                                                         | Waste processing for reuse, recycling and/or (energy) recovery |                                        |                                                                                                               | Mandatory                                                                           | SI                         |             |
|                                 | C4                                                         | Disposal of waste                                              |                                        |                                                                                                               | Mandatory                                                                           | SI                         |             |
|                                 | Additional information                                     | D<br><br>Benefits and loads beyond the system boundary         |                                        | D1                                                                                                            | Potential net benefits from reuse, recycling, energy recovery and/or other recovery | Optional                   | NO          |
| D2                              |                                                            |                                                                |                                        | Potential benefits and loads from exported utilities (e.g., electrical energy, thermal energy, potable water) | Optional                                                                            | NO                         |             |

Metodologia di calcolo

La valutazione WLC dell'edificio è stata condotta in accordo alle seguenti metodologie, entrambe utilizzano come riferimento tecnico la pubblicazione *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio* (Andreotti & Giordano, 2024):

- per la valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq relative all'EC delle opere civili e all'OC dell'edificio è stato utilizzato il "metodo di contabilizzazione BASE", afferente a uno stadio di progettazione preliminare [vedere *Paragrafo 3.3*];
- per la valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq relative all'EC degli impianti sono stati utilizzati i metodi di contabilizzazione "BASE - key materials" e "BASE - dati medi generici", indicati dal report per gli impianti e servizi MEP [vedere *Figura 5* e *Figura 6*].

Dati e database di riferimento

Il calcolo si basa sulle masse e sulle informazioni forniti dallo studio di progettazione Politecnica.

I dati impiegati come riferimento nella valutazione sono sia dati di tipo generico, provenienti da banche dati (Okobaudat), sia dati di tipo specifico, presenti in dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD).

Cut-off rules

Come mostrato in *Tabella 21* nella valutazione sono stati considerati tutti gli elementi che il progetto *INDICATE LIFE* ritiene necessari (Mandatory) e alcuni di quelli raccomandati (Recommended) e opzionali (Optional).

Tabella 21 - Elementi contabilizzati nel calcolo per l'edificio "CRIF21" in relazione alle indicazioni del progetto INDICATE LIFE

|                            |                                                        | REPORTING     |        |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|---------------|--------|
|                            |                                                        | INDICATE LIFE | CRIF21 |
| 0 Treatment and demolition | 0.1 Treatment and demolition works; Facilitating works | Recommended   | NO     |
| 1 Sub-structure            | 1.1 Foundations and piling                             | Mandatory     | SI     |
|                            | 1.2 Basement retaining walls and lowest slab           | Mandatory     | SI     |

|                                               |                                               |             |              |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|--------------|
| 2 Super structure                             | 2.1 Frame                                     | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.2 Upper floors                              | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.3 Roof                                      | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.4 Stairs, ramps and safety guarding         | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.5 External envelope including roof finishes | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.6 Windows and ext doors                     | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.7 Internal walls                            | Mandatory   | SI           |
|                                               | 2.8 Internal doors                            | Mandatory   | SI           |
| 3 Finishes                                    | 3.1 Wall finishes                             | Recommended | Parzialmente |
|                                               | 3.2 Floor finishes                            | Recommended | Parzialmente |
|                                               | 3.3 Ceiling finishes                          | Recommended | Parzialmente |
| 4 Furniture, furnishings and equipment (FF&E) | 4.1 General FF&E                              | Recommended | NO           |
|                                               | 4.2 Kitchen equipment                         | Recommended | NO           |
|                                               | 4.3 Specialist FF&E                           | Optional    | NO           |
|                                               | 4.4 Loose FF&E                                | Optional    | NO           |
|                                               | 4.5 Information Technology (IT)               | Optional    | NO           |
|                                               | 4.6 Audio and visual                          | Optional    | NO           |
| 5 Services                                    | 5.1 Public Health                             | Optional    | NO           |
|                                               | 5.2 Heating, Ventilation and Cooling (HVAC)   | Mandatory   | SI           |
|                                               | 5.3 Electrical installations                  | Recommended | NO           |
|                                               | 5.4 On site renewable energy generation       | Recommended | SI           |
|                                               | 5.5 Other systems                             | Recommended | Parzialmente |
| 6 Pre-fabricated buildings and units          | -                                             | Optional    | NO           |
| 7 Works to existing buildings                 | -                                             | Mandatory   | SI           |
| 8 External works                              | 8.1 Roads; Fencing, railings, walls; Etc.     | Recommended | Parzialmente |
|                                               | 8.2 Soft landscape, planting, irrigation      | Recommended | NO           |
|                                               | 8.3 External drainage; External services      | Recommended | Parzialmente |

### 5.2.2 EMBODIED CARBON

Nei seguenti paragrafi sono descritte le modalità indicate dal libro di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024) per il calcolo dell'EC dei diversi moduli e le assunzioni adottate per il caso studio. Vengono trattati prima le opere civili, e poi gli impianti (MEP).

#### Opere civili

##### Fase di Produzione (A1-A3)

Nella fase di Produzione l'obiettivo è quello di contabilizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq che si verificano in seguito alle operazioni di "Estrazione delle risorse" (A1), "Trasporto al sito costruttivo" (A2) e "Realizzazione dei prodotti finiti o semilavorati" (A3).

Nella valutazione dell'edificio CRIF21 sono stati presi in considerazione tutti e tre i moduli costituenti la fase di produzione, contabilizzandoli in forma aggregata (A1-A3).

##### Come si calcola.

Come indicato nell'*Equazione 3* secondo il "metodo BASE" relativo alla fase di Produzione il quantitativo di ogni materiale/prodotto (Mat<sub>j</sub>) deve essere moltiplicato per un coefficiente di emissione specifica (EC<sub>A1-A3-j</sub>).

Equazione 3 - Valutazione dell'Embodied Carbon per la fase di produzione A1-A3 (Andreotti & Giordano, 2024, p. 48)

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

##### Come è stato svolto il calcolo.

Sulla base del computo metrico delle opere civili fornito da Politecnica sono stati selezionati gli elementi da includere nel calcolo e quelli considerati trascurabili; in particolare, sono stati esclusi la maggior parte degli elementi puntuali o presenti in quantità ridotta (es. "zoccolino battiscopa in pietra naturale"), nonché quelli appartenenti ad opere non rilevanti ai fini della valutazione A1-A3 (es. "scavo di sbancamento").

Le quantità indicate nel computo metrico si riferiscono allo scenario Bill of Quantities (BoQ) e includono, oltre ai materiali necessari per la



costruzione dell'edificio, anche le eccedenze e gli sfridi. Per ottenere la massa effettiva Design as Built (DaB), cioè riferita unicamente ai materiali effettivamente incorporati nell'edificio, ogni quantitativo è stato ridotto applicando una percentuale correttiva. In *Tabella 22* sono riportate le percentuali considerate per ogni tipologia di materiale/elemento.

Tabella 22 - Percentuale di eccedenze e sfrido per categoria di materiale/elemento (fonte: Andreotti & Giordano, 2024, pp. 50-51)

| Categoria di materiale/elemento | Percentuale di eccedenza e sfrido [%] |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Materiali metallici             | 2%                                    |
| Materiali isolanti              | 9%                                    |
| Materiali cementizi             | 5%                                    |
| Materiali impermeabilizzanti    | 9%                                    |
| Materiale inerte                | -                                     |
| Materiali ceramici              | 15%                                   |
| Materiali lapidei               | -                                     |
| Vernici e resine                | 5%                                    |
| Serramenti                      | -                                     |
| Materiali a base di gesso       | 22%                                   |
| Altro                           | 5%                                    |
| C.a.                            | 5%                                    |

Per la determinazione di  $EC_{A1-A3-j}$  ad ogni materiale selezionato per la contabilizzazione è stato associato un fattore di emissione specifica; sebbene il "metodo BASE" illustrato nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024) prevederebbe l'utilizzo esclusivo di dati generici (rintracciabili in database quali Okobaudat) nel calcolo per CRIF21 sono stati utilizzati anche dati specifici presenti in EPD, quando forniti dallo studio progettista.

Per alcuni degli elementi descritti nel computo metrico come "pareti" (sia interne che esterne) non è stato possibile individuare un coefficiente di emissione specifica unico da associare al pacchetto di elemento tecnico. Sono pertanto stati presi in considerazione i singoli elementi costituenti (rintracciati tramite la stratigrafia presentata in scheda tecnica), ai quali è stato associato un coefficiente di emissione specifica; i valori di

ogni strato sono poi stati normalizzati al m<sup>2</sup> e sommati per restituire un coefficiente di emissione specifica unico relativo alla parete in analisi [vedere *Tabella 23*].

Tabella 23 - Definizione del Coefficiente di emissione specifica in kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> per l'elemento "parete interna autoportante con doppio rivestimento in cartongesso e doppia struttura parallela collegata, coibentata"

| ELEMENTO                                                                                                              | SCHEDA TECNICA                        |              | COEFFICIENTE DI EMISSIONE SPECIFICA |    |                              |                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------------------------------|----|------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                                                                                       | STRATIGRAFIA                          | SPESSORE [m] | FONTE                               | FU | A1-A3 [kgCO <sub>2</sub> eq] | A1-A3 [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ] |
| PARETE INTERNA AUTOPORTANTE CON DOPPIO RIVESTIMENTO IN CARTONGESSO E DOPPIA STRUTTURA PARALLELA COLLEGATA, COIBENTATA | Wallboard 13                          | 0,013        | EPD                                 | m2 | 2,5                          | 2,50                                         |
|                                                                                                                       | Hydro 13                              | 0,013        | EPD                                 | m2 | 2,6                          | 2,60                                         |
|                                                                                                                       | Lisaplac 13                           | 0,013        | OKO                                 | m3 | 1,708                        | 0,02                                         |
|                                                                                                                       | Stucco Evoplus 60                     | 0,013        | OKO                                 | m3 | 138,2                        | 1,80                                         |
|                                                                                                                       | Acustipar 45 mm                       | 0,045        | EPD                                 | m2 | 0,765                        | 0,77                                         |
|                                                                                                                       | Struttura (guide e montanti) da 75 mm | 0,075        | OKO                                 | m  | 2,35                         | 4,70                                         |
|                                                                                                                       |                                       | 0,172        | -                                   | -  | -                            | 12,38                                        |

Risultati fase.

Al termine del calcolo per la fase di Produzione A1-A3 è risultato un EC di 16.295,26 tCO<sub>2</sub>eq.

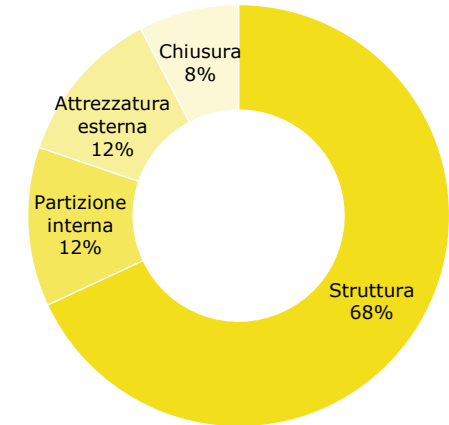
Tabella 24 - EC A1-A3 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| UNITÀ TECNOLOGICA    | MASSA [t] | EC A1-A3 [tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|-----------|--------------------------------|
| Struttura            | 49.760,26 | 11.085,27                      |
| Partizione interna   | 5.560,87  | 1.992,18                       |
| Attrezzatura esterna | 2.858,86  | 1.965,26                       |
| Chiusura             | 6.636,21  | 1.252,55                       |
| TOTALE               | 64.816,21 | 16.295,26                      |

Tabella 25 - EC A1-A3 per unità di superficie

| AREA  | [m <sup>2</sup> ] | A1-A3 [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------|----------------------------------------------|
| GFA   | 27.500            | 592,6                                        |
| GIA   | 20.513            | 794,4                                        |
| NHA   | 10.129            | 1.608,7                                      |
| LA/UL | 10.478            | 1.555,2                                      |

Grafico 2 - EC A1-A3 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290



In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle quattro categorie "Strutture", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

Come si può osservare dalla *Tabella 24* e dal *Grafico 2* i materiali/elementi che concorrono maggiormente alla quota EC A1-A3, con un'incidenza del 68%, sono quelli che costituiscono la struttura dell'edificio; le partizioni interne e le attrezzature esterne pesano entrambe il 12% mentre le chiusure sono responsabili del residuo 8% delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq.

Un'altra analisi è stata condotta suddividendo i dati per "categorie di materiali", in questo caso gli elementi sono stati classificati in dodici sezioni: "Materiali metallici", "Materiali isolanti", "Materiali cementizi",

"Materiali impermeabilizzanti", "Materiale inerte", "Materiali ceramici", "Materiali lapidei", "Vernici e resine", "Serramenti", "Materiali a base di gesso", "Calcestruzzo armato" e "Altro".

Come mostrato in *Tabella 26* e nel *Grafico 3* le categorie maggiormente responsabili delle emissioni EC A1-A3 sono quelle "C.a.", con il 30%, "Materiali cementizi", con il 28%, e "Materiali metallici", con il 26%; tali risultati sono dovuti alla ingente massa di questi prodotti impiegata nell'edificio e ai loro processi di produzione altamente energivori.

Il residuo 16% di emissioni è dovuto alla produzione di "Serramenti" (7%), di "Vernici e resine" (2%), di "materiali a base di gesso" (1%), di "materiali impermeabilizzanti" (1%), di "materiali isolanti" (1%) e di "altro" (4%).

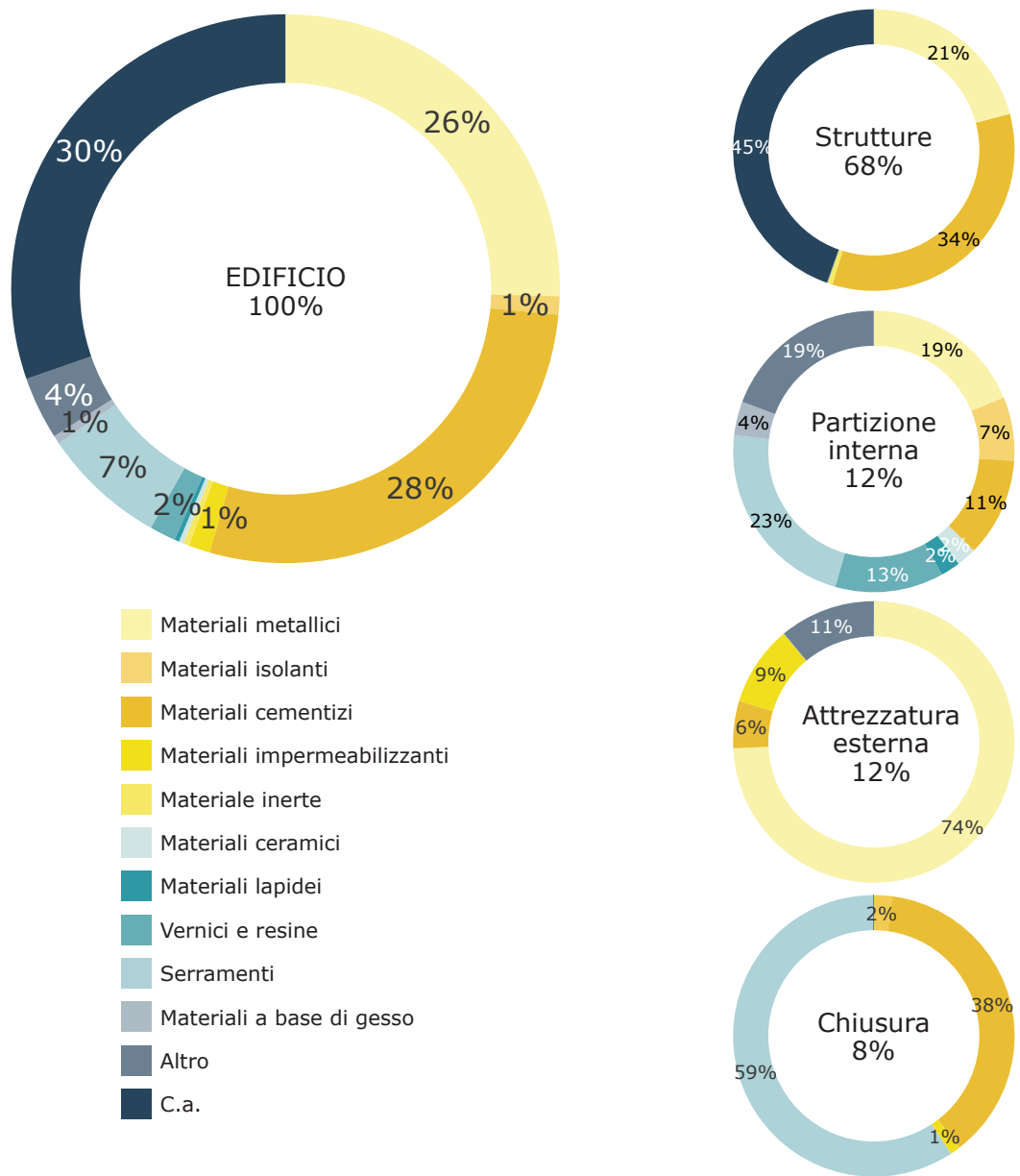
Tabella 26 - EC A1-A3 per categorie di materiale

|                           | Strut.   | Chius.  | Par. interna | Att. esterna | TOT      |
|---------------------------|----------|---------|--------------|--------------|----------|
| Materiali metallici       | 2.313,2  | 0,2     | 375,1        | 1.459,5      | 4.148,0  |
| Materiali isolanti        | 0,0      | 25,9    | 146,9        | 0,0          | 172,8    |
| Materiali cementizi       | 3.756,7  | 469,8   | 227,1        | 106,8        | 4.560,3  |
| Materiali imp.            | 9,5      | 14,9    | 0,0          | 181,7        | 206,2    |
| Materiale inerte          | 55,1     | 0,0     | 0,0          | 0,0          | 55,1     |
| Materiali ceramici        | 0,0      | 0,0     | 45,4         | 0,3          | 45,6     |
| Materiali lapidei         | 0,0      | 0,0     | 36,5         | 0,4          | 36,9     |
| Vernici e resine          | 1,0      | 0,0     | 249,2        | 0,0          | 250,1    |
| Serramenti                | 0,0      | 741,0   | 448,9        | 0,0          | 1.190,0  |
| Materiali a base di gesso | 2,4      | 0,0     | 77,8         | 0,1          | 80,4     |
| Altro                     | 3,2      | 0,6     | 385,3        | 215,0        | 604,2    |
| C.a.                      | 4.944,2  | 0,0     | 0,0          | 1,5          | 4.945,7  |
| TOT                       | 11.085,3 | 1.252,6 | 1.992,2      | 1.965,3      | 16.295,3 |

Una volta analizzati i materiali responsabili delle emissioni relative all'intero edificio CRIF21, ci si è interrogati sulla loro allocazione fra le categorie "Strutture", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

In linea con quanto già osservato le emissioni delle "Strutture" sono provocate quasi esclusivamente da "Materiali metallici", "Materiali cementizi" e "c.a."

Grafico 3 - EC A1-A3 per categorie di materiale



## FASE DI COSTRUZIONE (A4-A5)

Nella fase di costruzione l'obiettivo è quello di contabilizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq che si verificano durante le operazioni di "Trasporto al sito di costruzione" (A4) e "Costruzione" (A5).

Nella valutazione dell'edificio CRIF21 sono stati presi in considerazione entrambi i moduli costituenti della fase di Costruzione, valutati in maniera indipendente (A4, A5).

## A4 – TRASPORTO AL SITO DI COSTRUZIONE

### Come si calcola.

Per il calcolo del modulo di Trasporto al sito di costruzione (A4) con "metodo BASE" (Andreotti & Giordano, 2024) sono necessarie informazioni generiche circa la distanza del viaggio e la tipologia di mezzo impiegato; il calcolo si articola in 7 fasi:

- 1) Identificazione della tipologia di trasporto;
- 2) Calcolo del numero di viaggi per trasportare il materiale (per trasporti su gomma);
- 3) Determinazione della distanza;
- 4) Identificazione delle caratteristiche del viaggio (per trasporti su gomma);
- 5) Calcolo del consumo specifico;
- 6) Calcolo del consumo del mezzo;
- 7) Calcolo dell'ECA4 dei Trasporti al cantiere.

### Come è stato svolto il calcolo.

Nel calcolo sono stati ipotizzati viaggi su gomma mediante mezzi alimentati a diesel, considerando una distanza di 300 km per tutti i materiali (produzione nazionale), ad eccezione del calcestruzzo, per il quale si è deciso di ridurre la distanza di trasporto a 50 km (produzione locale); questa scelta è giustificata dal fatto che il calcestruzzo non può essere trasportato per lunghe distanze senza compromettere le proprie caratteristiche prestazionali.

### Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di "Trasporto al sito di costruzione" A4 è risultato un EC di 668,45 tCO<sub>2</sub>eq.

Tabella 27 - EC A4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| UNITÀ TECNOLOGICA    | MASSA [t] | EC A1-A3 [tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|-----------|--------------------------------|
| Struttura            | 51.595,38 | 400,47                         |
| Partizione interna   | 6.036,79  | 118,65                         |
| Attrezzatura esterna | 6.969,36  | 104,16                         |
| Chiusura             | 3.046,00  | 45,17                          |
| TOTALE               | 67.647,54 | 668,45                         |

Tabella 28 - EC A4 per unità di superficie

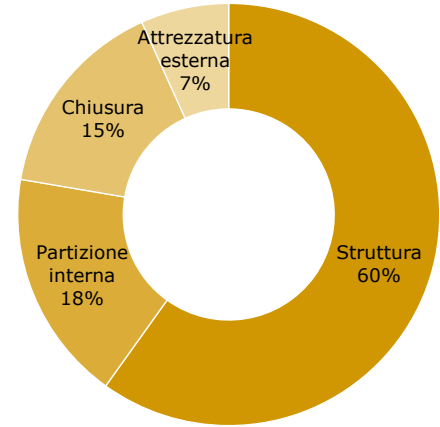
| AREA  | [m2]   | A4 [kgCO <sub>2</sub> eq/m2] |
|-------|--------|------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 24,3                         |
| GIA   | 20.513 | 32,6                         |
| NHA   | 10.129 | 66,0                         |
| LA/UL | 10.478 | 63,8                         |

In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle 4 categorie "Strutture", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

Come si può osservare dalla *Tabella 27* e dal *Grafico 4* i materiali/elementi che concorrono maggiormente alla quota EC A4, con un'incidenza del 60%, sono quelli che costituiscono la Struttura dell'edificio; le Partizioni interne pesano il 18%, e la Chiusura il 15% mentre le Attrezzature esterne sono responsabili del residuo 7% delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq.

Anche per il modulo A4 è stata condotta l'analisi per "key-materials", suddividendo dunque i dati nelle dodici "categorie di materiali": "Materiali metallici", "Materiali isolanti", "Materiali cementizi", "Materiali impermeabilizzanti", "Materiale inerte", "Materiali ceramici", "Materiali

Grafico 4 - EC A4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290.



lapidei", "Vernici e resine", "Serramenti", "Materiali a base di gesso", "Calcestruzzo armato" e "Altro".

Come mostrato in *Tabella 29* e nel *Grafico 5* le categorie maggiormente responsabili delle emissioni EC A4 sono quelle "Materiale inerte", con il 35% e "Materiali cementizi", con il 17%. Seguono "Materiali isolanti", con l'11%, "Materiali metallici", con il 10% e "Serramenti" e "C.a", entrambi con il 9%. Questi risultati si discostano da quanto osservato per la fase di Produzione in quanto, nel modulo A4, incide, oltre alla massa dei prodotti anche la loro densità e la distanza di trasporto.

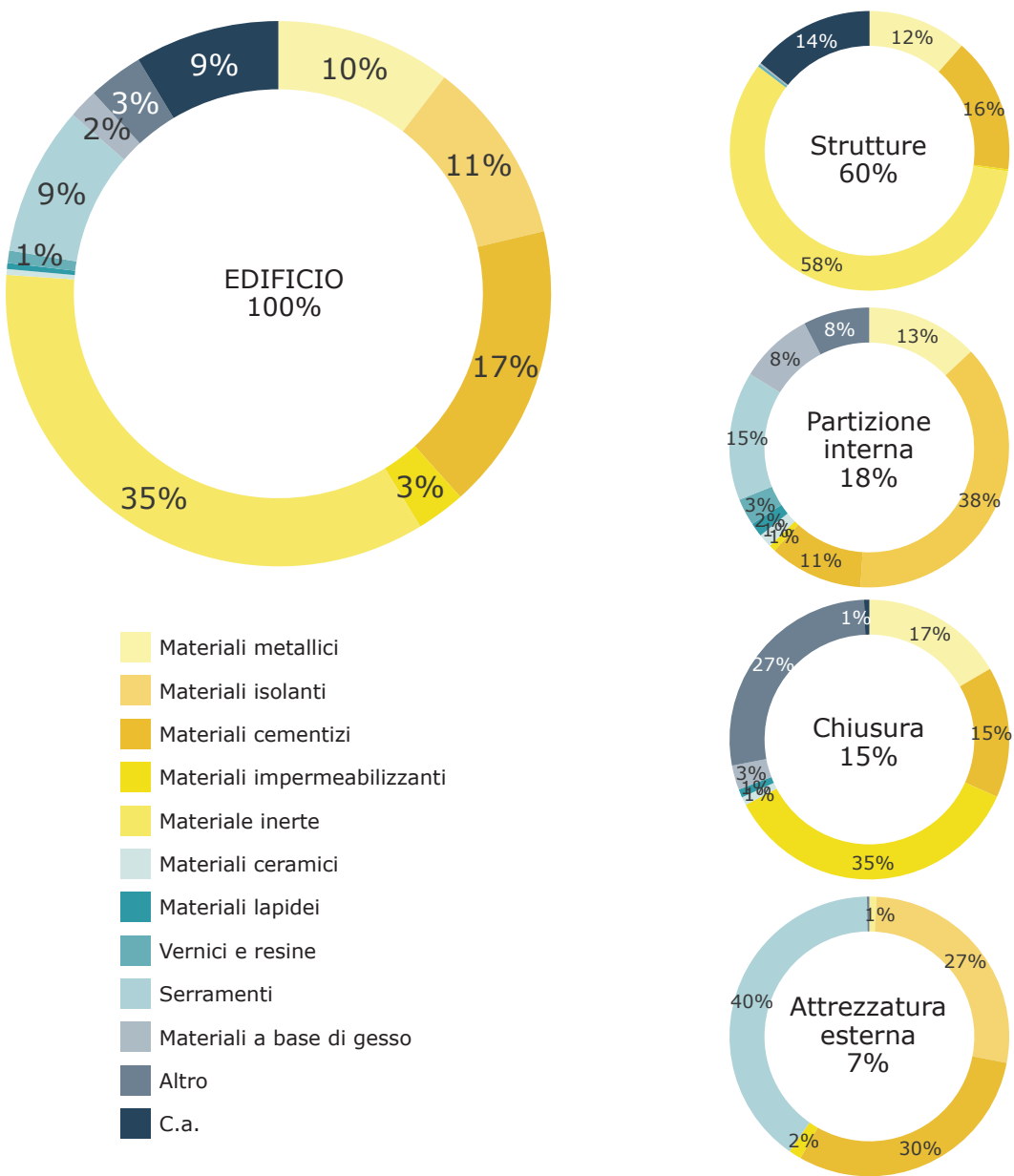
Il residuo 9% di emissioni è dovuto al trasporto di "Materiali impermeabilizzanti" (3%), di "Materiali a base di gesso" (2%), di "Vernici e resine" (1%) e di "Altro" (3%).

Tabella 29 - EC A4 per categorie di materiale

|                           | Strut. | Chius. | Par. interna | Att. esterna | TOT   |
|---------------------------|--------|--------|--------------|--------------|-------|
| Materiali metallici       | 45,9   | 0,9    | 15,2         | 7,5          | 69,4  |
| Materiali isolanti        | 0,0    | 28,3   | 44,5         | 0,0          | 72,8  |
| Materiali cementizi       | 62,8   | 31,4   | 12,7         | 6,8          | 113,7 |
| Materiali imp.            | 0,9    | 1,5    | 0,9          | 16,1         | 19,3  |
| Materiale inerte          | 232,2  | 0,0    | 0,0          | 0,0          | 232,2 |
| Materiali ceramici        | 0,0    | 0,0    | 1,9          | 0,4          | 2,3   |
| Materiali lapidei         | 0,0    | 0,0    | 3,6          | 0,4          | 4,0   |
| Vernici e resine          | 1,2    | 0,0    | 3,7          | 0,0          | 4,9   |
| Serramenti                | 0,0    | 41,7   | 17,4         | 0,0          | 59,1  |
| Materiali a base di gesso | 0,5    | 0,0    | 10,0         | 1,3          | 11,8  |
| Altro                     | 0,1    | 0,3    | 9,0          | 12,4         | 21,8  |
| C.a.                      | 56,9   | 0,0    | 0,0          | 0,3          | 57,2  |
| TOT                       | 400,5  | 104,2  | 118,7        | 45,2         | 668,5 |

Una volta analizzati i materiali responsabili delle emissioni relative all'intero edificio CRIF21, ci si è interrogati sulla loro allocazione fra le categorie "Strutture", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

Grafico 5 - EC A4 per categorie di materiale



## A5 -COSTRUZIONE

Il modulo di costruzione A5 è comprensivo di due parti:

- la prima (A5) è legata alle emissioni prodotte dai macchinari durante il processo di costruzione;
- la seconda (A5w) riguarda la gestione delle eccedenze e degli sfridi (rifiuti) prodotti in cantiere.

## A5-COSTRUZIONE

### Come si calcola.

Per la contabilizzazione con "metodo BASE" del modulo di Costruzione (A5), secondo quanto indicato nel testo di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024), sono necessarie informazioni generiche sulle attrezzature e sui mezzi impiegati nel cantiere.

la valutazione si articola in 5 step:

- 1) calcolo del volume (o peso totale) di un determinato materiale/prodotto/componente;
- 2) identificazione dell'attrezzatura o del mezzo da utilizzare e del numero di ore di utilizzo;
- 3) calcolo delle emissioni orarie dell'attrezzatura o del mezzo;
- 4) conversione dell'unità di misura delle emissioni di metano (da CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>eq);
- 5) calcolo dell'ECA5 dei processi di Costruzione.

### Come è stato svolto il calcolo.

1) Nel calcolo sono stati presi in considerazione, oltre ai materiali/elementi selezionati per la fase A1-A3, anche le operazioni di sbancamento per le fondazioni.

Si è fatto riferimento ai quantitativi indicati nel computo metrico (BoQ).

2) Lo studio di progettazione Politecnica ha fornito l'elenco delle tipologie di macchinario utilizzate in cantiere. Sulla base di queste informazioni è stata fatta una selezione delle attrezzature presenti nel *foglio SCAB Fleet Average Emission Factors (Diesel)*, 2025 presente all'interno del documento *Off-road Mobile Source Emission Factors (Scenario Years 2007 - 2025)* curato dalla South Coast AQMD.

A ognuno dei macchinari utilizzati è stato associato un coefficiente di produzione oraria, che è stato moltiplicato per la quantità di materiale da produrre/trasportare/lavorare, al fine di ottenere le ore di utilizzo totali del macchinario.

Siccome non si aveva accesso ai dati di produzione oraria degli specifici macchinari utilizzati in cantiere, è stata richiesta all'intelligenza artificiale (Chat GPT) una stima media della produzione oraria per categoria di



macchinario per tre diverse dimensioni di cantiere o per tre range di altezza degli edifici, a seconda dei macchinari in analisi [vedere *Tabella 30*].

3) Si riportano in *Tabella 30* i macchinari selezionati dal foglio *SCAB Fleet Average Emission Factors (Diesel), 2025* associati a quelli utilizzati nel cantiere del CRIF21 e i coefficienti di produzione oraria che sono stati utilizzati per ognuno di essi (in grassetto). Il cantiere CRIF21, che misura 6.000 m<sup>2</sup>, rientra nella categoria “Cantiere medio” e l’edificio, con i suoi sei piani fuori terra, è considerabile “Edificio di media altezza”. Per ognuno dei macchinari è stato selezionato lo scenario di produzione oraria peggiorativo (ossia il valore di produzione oraria inferiore per ogni range di produttività). Sono state considerate trascurabili le emissioni prodotte da montacarichi, muletti, piattaforme di lavoro elevabili e motocompressori (sebbene compresi nella lista di macchinari utilizzati per la costruzione dell’edificio).

Tabella 30 - Macchinari e relative produzioni orarie per tipologia di cantiere o altezza edificio

|                                    | Cantiere piccolo<br><5000 m <sup>2</sup> | Cantiere medio<br>5.000-15.000 m <sup>2</sup> | Cantiere grande<br>>15000 m <sup>2</sup> |
|------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                    | kg/h                                     | kg/h                                          | kg/h                                     |
| Miscelatori cemento/malta          | 57.600-223.200                           | <b>134.400</b> -316.800                       | 268.800-633.600                          |
| Escavatori                         | 160.000-270.000                          | <b>580.000</b> -972.000                       | 900.000-1.512.000                        |
| Pompe                              | 48.000-96.000                            | <b>120.000</b> -288.000                       | 240.000-600.000                          |
| Rulli                              | 216.000-1.800.000                        | <b>1.500.000</b> -3.500.000                   | 3.000.000-6.000.000                      |
|                                    | Edificio basso<br><3 piani               | Edificio di media<br>altezza 3-10 piani       | Edificio alto<br>>10 piani               |
|                                    | kg/h                                     | kg/h                                          | kg/h                                     |
| Gru                                | 1.200-3.500                              | <b>3.000</b> -6.000                           | 6.000-10.000                             |
|                                    | m/h                                      | m/h                                           | m/h                                      |
| Impianti di perforazione/alesatura | 10-25                                    | <b>25</b> -60                                 | 60-120                                   |

4) Nel foglio “SCAB Fleet Average Emission Factors (Diesel), 2025” sono riportate le emissioni orarie di ROG (gas organici reattivi), CO (Monossido di carbonio), NOX (Ossidi di azoto), SOX (Ossidi di zolfo), PM (particolato), CO<sub>2</sub> (Anidride carbonica) e CH<sub>4</sub> (Metano) per ogni macchinario. Nel calcolo della fase A5 sono stati presi in considerazione solo i gas che contribuiscono al surriscaldamento globale (GWP) , pertanto CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Dal medesimo foglio “SCAB” è stato selezionato il dato medio aggregato di CO<sub>2</sub>, valore che si è poi moltiplicato per le ore di utilizzo; la medesima procedura è stata attuata per il dato medio aggregato di CH<sub>4</sub>. Entrambi i valori sono stati divisi per 2,205 al fine di convertire il risultato da libbre in chilogrammi.Per ottenere le emissioni di metano in kgCO<sub>2</sub>eq il valore ottenuto nello step precedente è stato ancora moltiplicato per 28, ossia il fattore di conversione del metano in CO<sub>2</sub>eq stabilito nel report dell’Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013).

5) Per ottenere le emissioni totali prodotte da un macchinario sono state sommate le emissioni di CO<sub>2</sub> e quelle di CH<sub>4</sub> (convertite in kgCO<sub>2</sub>eq). Le emissioni dei singoli macchinari sono poi state addizionate fra di loro per ottenere un unico valore di EC A5, riferito all’intero cantiere.

Al termine del calcolo per la componente A5 del modulo A5 è risultato un EC di 40,4 tCO<sub>2</sub>eq.

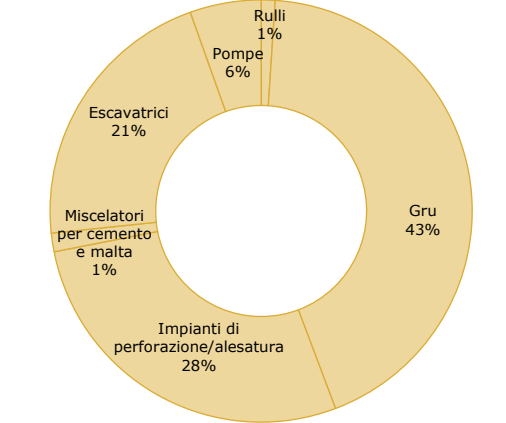
Tabella 31 - EC A5 per tipologia di macchinario in accordo con “SCAB Fleet Average Emission Factors (Diesel), 2025” (South Coast AQMD, 2024)

| MACCHINARIO                        | ORE DI UTILIZZO<br>[h] | EC A5<br>[tCO <sub>2</sub> eq] |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Rulli                              | 1,3                    | 0,4                            |
| Gru                                | 299,1                  | 17,5                           |
| Impianti di perforazione/alesatura | 149,3                  | 11,2                           |
| Miscelatori per cemento e malta    | 174,7                  | 0,6                            |
| Escavatrici                        | 158,1                  | 8,6                            |
| Pompe                              | 97,9                   | 2,2                            |
| TOTALE                             | 880,4                  | 40,4                           |

Tabella 32 - EC A5 per unità di superficie

| AREA  | [m²]   | A5<br>[kgCO <sub>2</sub> eq/m²] |
|-------|--------|---------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 1,47                            |
| GIA   | 20.513 | 1,97                            |
| NHA   | 10.129 | 3,99                            |
| LA/UL | 10.478 | 3,86                            |

Grafico 6 - EC A5 per tipologia di macchinario



I macchinari maggiormente responsabili delle emissioni di gas climalteranti in fase di Costruzione (A5) sono le "Gru", con il 43% , gli "impianti di perforazione/alesatura", con il 28% e le "Escavatrici", con il 21%. Seguono le "Pompe per calcestruzzo", responsabili dell'8% e i "Rulli" e i "Miscelatori di cemento e malta", responsabili entrambi dell'1% delle emissioni.

A5w-COSTRUZIONE

Come si calcola.

Per la contabilizzazione con “metodo BASE” del modulo di Costruzione A5w, secondo quanto indicato nel testo di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024), è possibile condurre le stesse operazioni indicate per i moduli A1-A5 dei materiali che conferiscono alla costruzione Design as Built (DaB).

Come è stato svolto il calcolo.

Per ottenere la quantità effettiva di sfridi ed eccedenze sono state utilizzate le masse sottratte ai valori del computo metrico (BoQ) nel calcolo della fase di Produzione. In *Tabella 22* (p. 79) sono riportate le percentuali considerate, rispetto alle masse da computo, per ogni tipologia di materiale/elemento.

Al termine del calcolo per la componente A5w del modulo A5 è risultata un EC di 698,14 tCO<sub>2</sub>eq.

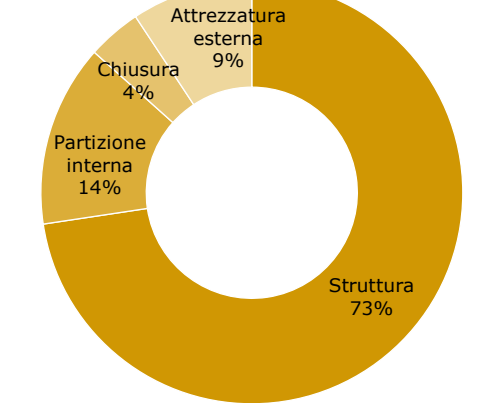
Tabella 34 - EC A5w per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| UNITÀ TECNOLOGICA    | MASSA<br>[t] | EC A1-A3<br>[tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|--------------|-----------------------------------|
| Struttura            | 51.595,38    | 507,00                            |
| Partizione interna   | 6.036,79     | 97,49                             |
| Attrezzatura esterna | 6.969,36     | 28,81                             |
| Chiusura             | 3.046,00     | 64,84                             |
| TOTALE               | 2.831,33     | 698,14                            |

Tabella 33 - EC A5w per unità di superficie

| AREA  | [m²]   | A5w<br>[kgCO <sub>2</sub> eq/m²] |
|-------|--------|----------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 25,4                             |
| GIA   | 20.513 | 34,0                             |
| NHA   | 10.129 | 68,9                             |
| LA/UL | 10.478 | 66,6                             |

Grafico 7 - EC A5w per tipologia di macchinario



In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle 4 categorie “Strutture”, “Partizione interna”, “Attrezzatura esterna” e “Chiusura”.

Come si può osservare dalla Tabella 34 e dal Grafico 7 i materiali/elementi che concorrono maggiormente alla quota EC A5w, con un’incidenza del 73%, sono quelli che costituiscono la Struttura dell’edificio. Le Partizioni interne pesano il 14%, le Attrezzature esterne sono responsabili del 9% mentre il residuo 4% è dovuto alle Chiusure.

Anche per il modulo A5w è stata condotta l’analisi per “key-materials”, suddividendo dunque i dati nelle dodici “categorie di materiali: “Materiali metallici”, “Materiali isolanti”, “Materiali cementizi”, “Materiali impermeabilizzanti”, “Materiale inerte”, “Materiali ceramici”, “Materiali lapidei”, “Vernici e resine”, “Serramenti”, “Materiali a base di gesso”,

“Calcestruzzo armato” e “Altro”.

Come mostrato in Tabella 35 e nel Grafico 8 le categorie maggiormente responsabili delle emissioni EC A1-A3 sono quelle “C.a.”, con il 37% e “Materiali cementizio”, con il 34%. Altra categoria rilevante, responsabile del 12% di emissioni è quella dei “Materiali metallici”.

Il residuo 17% di emissioni è dovuto a sfridi e eccedenze di “Materiali a base di gesso” e di “Materiali impermeabilizzanti” (entrambi con il 3%), di “Materiali isolanti” e di “Serramenti” (entrambi con il 2%), di “Materiali lapidei” e di “Materiali ceramici” (entrambi con l'1%) e della categoria “Altro” (5%).

Nonostante “Materiali ceramici”, “Materiali a base di gesso”, “Materiali

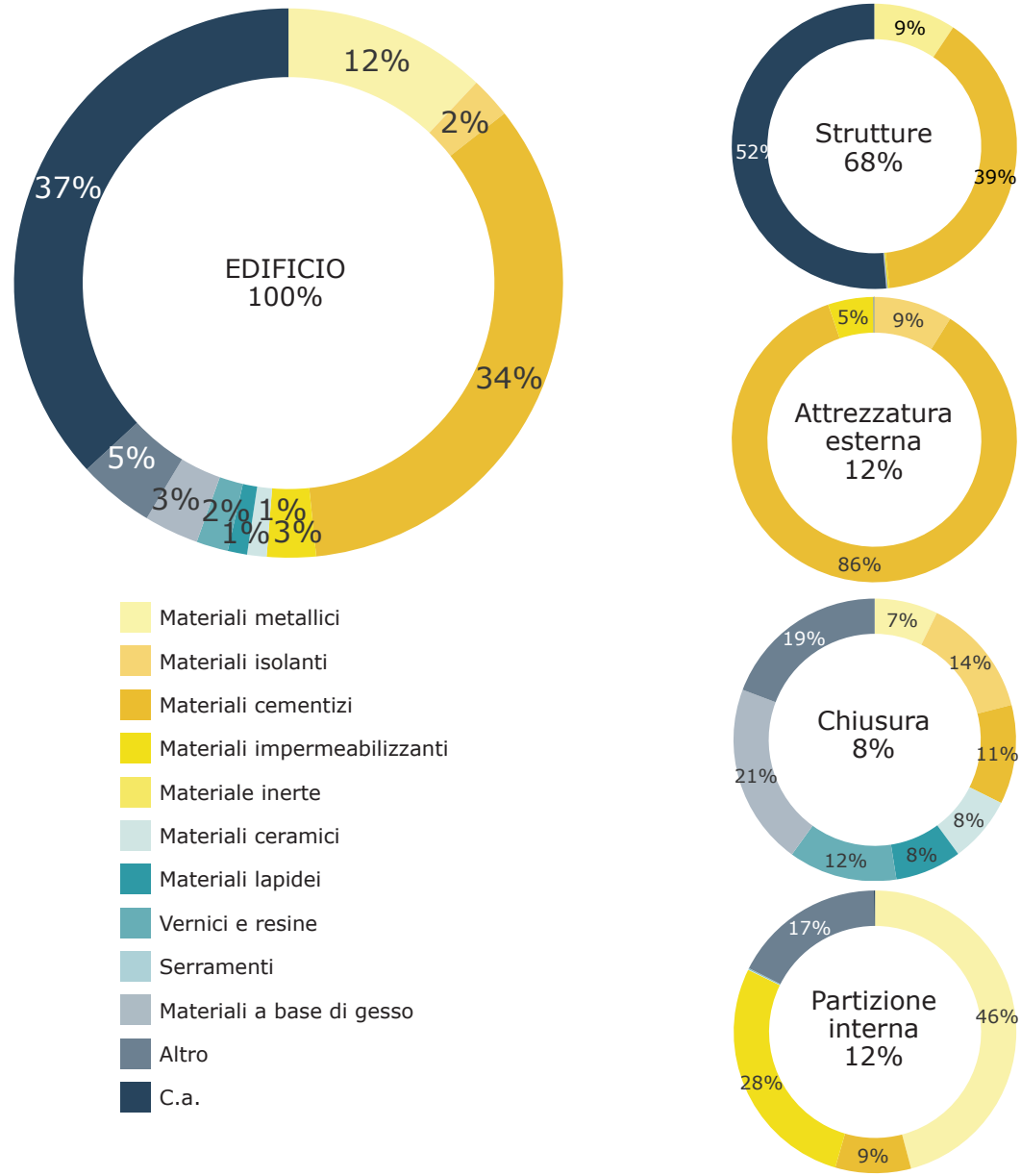
Tabella 35 - EC A5w per categorie di materiale

|                           | Strut. | Chius. | Par.<br>interna | Att.<br>esterna | TOT   |
|---------------------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-------|
| Materiali metallici       | 47,2   | 0,0    | 7,7             | 29,8            | 84,7  |
| Materiali isolanti        | 0,0    | 2,6    | 14,5            | 0,0             | 17,1  |
| Materiali cementizi       | 197,7  | 24,7   | 12,0            | 5,6             | 240,0 |
| Materiali imp.            | 0,9    | 1,5    | 0,0             | 18,0            | 20,4  |
| Materiale inerte          | 0,0    | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 0,0   |
| Materiali ceramici        | 0,0    | 0,0    | 8,0             | 0,0             | 8,1   |
| Materiali lapidei         | 0,0    | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 0,0   |
| Vernici e resine          | 0,1    | 0,0    | 13,1            | 0,0             | 13,2  |
| Serramenti                | 0,0    | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 0,0   |
| Materiali a base di gesso | 0,7    | 0,0    | 22,0            | 0,0             | 22,7  |
| Altro                     | 0,2    | 0,0    | 20,3            | 11,3            | 31,8  |
| C.a.                      | 260,2  | 0,0    | 0,0             | 0,1             | 260,3 |
| TOT                       | 507,0  | 28,8   | 97,5            | 64,8            | 698,1 |

isolanti" e "Materiali impermeabilizzanti" presentino un tasso di sfrido/eccedenza maggiore rispetto alle altre categorie [Tabella 22], questi non sono particolarmente influenti nelle emissioni A5w. Ciò è dovuto alla scarsità di questi prodotti all'interno del progetto CRIF21, rispetto ai prodotti di altre categorie.

Una volta analizzati i materiali responsabili delle emissioni relative all'intero edificio CRIF21, ci si è interrogati sulla loro allocazione fra le categorie “Strutture”, “Partizione interna”, “Attrezzatura esterna” e “Chiusura”.

Grafico 8 - EC A5w per categorie di materiale



### Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di costruzione A5 è risultata un EC di 738,58 tCO<sub>2</sub>eq, risultato della somma tra la componente A5 e quella A5w, rispettivamente di 40,4 tCO<sub>2</sub>eq e 698,14 tCO<sub>2</sub>eq.

### Risultati fase.

Il contributo della fase di Costruzione A4-A5 è di 1.407,03 tCO<sub>2</sub>eq.

## FASE D'USO (B1-B7)

Nella fase d'uso l'obiettivo è quello di contabilizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq di cui è responsabile l'edificio durante il periodo di attività.

Questa fase è comprensiva di una componente EC, costituita dai moduli di Uso (B1), Manutenzione (B2), Riparazione (B3), Sostituzione (B4) e Ristrutturazione (B5) e da una componente Operational Carbon, che fa riferimento al consumo energetico (B6) e a quello idrico (B7).

Si presentano di seguito le modalità di calcolo e le operazioni condotte per la valutazione dei moduli che compongono la quota EC della fase d'uso; il calcolo della componente OC è descritto nel *Paragrafo 5.2.3*.

All'interno dello studio sono stati contabilizzati i moduli B2, B3 e B4. Il modulo B1 (atto alla valutazione di possibili assorbimenti o riduzioni di CO<sub>2</sub>eq durante l'utilizzo del manufatto) è stato escluso dal calcolo perché nel progetto non è previsto né l'utilizzo di sistemi o tecnologie in grado di rimuovere CO<sub>2</sub> dall'atmosfera (Carbon Uptake) né di sistemi vegetali rilevanti (Carbon off-setting).

Il modulo B5 non è stato oggetto di studio perché non sono previste ristrutturazioni durante lo STR del manufatto edilizio.

## B2 - MANUTENZIONE

### Come si calcola.

Per la determinazione del modulo di Manutenzione B2 di "Manufatti edilizi destinati ad altre funzioni rispetto a quella residenziale" il "metodo BASE" presentato nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024), prevede di assumere che questi possano essere rappresentati dall'1% delle emissioni ottenute sommando le fasi da A1 a A5 precedentemente calcolate.

### Come è stato svolto il calcolo.

Non sono state apportate variazioni alla modalità di calcolo indicata dal documento di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024).

### Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di manutenzione B2 è risultata un valore di EC di 177,02 tCO<sub>2</sub>eq.

## B3 - RIPARAZIONE

### Come si calcola.

In accordo con la metodologia proposta nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024, pp. 84-89), si può assumere che questo modulo sia equiparabile alle 25% dell'EC del modulo B2.

Come è stato svolto il calcolo.

Non sono state apportate variazioni alla modalità di calcolo indicata dal documento di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024).

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di riparazione B3 è risultata un EC di 26,55 tCO<sub>2</sub>eq.

B4 – SOSTITUZIONE

Come si calcola.

Il calcolo del modulo di Sostituzione (B4) secondo quanto prescritto dal “metodo BASE” prevede due step sequenziali; il primo riguarda la determinazione della vita utile dei materiali/elementi che costituiscono l’edificio e dunque il numero di sostituzioni nello scenario temporale di riferimento, il secondo prevede la moltiplicazione del numero di sostituzioni per le emissioni calcolate per il prodotto nei moduli A1-A3, A4, A5, C1, C2, C3, C4.

Come è stato svolto il calcolo.

La vita utile dei materiali/elementi è stata stimata utilizzando le indicazioni che la pubblicazione fornisce rispetto agli elementi che compongono un edificio (Andreotti & Giordano, 2024, p. 89). Gli elementi strutturali sono gli unici per cui non risulta necessaria alcuna sostituzione durante i 50 anni dello scenario temporale di riferimento (STR) dell’edificio, tutte le altre componenti invece ne richiedono almeno una dopo 20 o 30 anni dalla costruzione.

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di sostituzione B4 è risultata un EC di 8.594,54 tCO<sub>2</sub>eq.

Risultati fase.

Il totale delle emissioni relative all’EC della fase d’Uso, dato dalla somma dei moduli B2, B3 e B4 è di 6.443,40 tCO<sub>2</sub>eq.

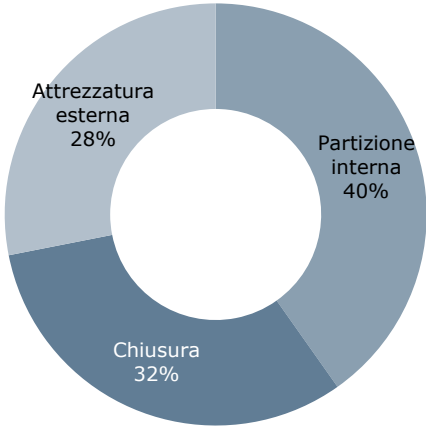
Tabella 36 - EC B4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| UNITÀ TECNOLOGICA    | MASSA [t] | EC A1-A3 [tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|-----------|--------------------------------|
| Chiusura             | 8.447,98  | 0,00                           |
| Partizione interna   | 5.276,38  | 2.590,56                       |
| Attrezzatura esterna | 2.058,59  | 2.042,65                       |
| Struttura            | 0,00      | 1.810,19                       |
| TOTALE               | 15.782,96 | 6.443,40                       |

Tabella 37 - EC B4 per unità di superficie

| AREA  | [m²]   | B4 [kgCO <sub>2</sub> eq/m²] |
|-------|--------|------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 234,3                        |
| GIA   | 20.513 | 79,4                         |
| NHA   | 10.129 | 22,7                         |
| LA/UL | 10.478 | 26,5                         |

Grafico 9 - EC B4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290



In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle quattro categorie “Strutture”, “Partizione interna”, “Attrezzatura esterna” e “Chiusura”.  
Come evidenziato dalla *Tabella 36* e dal *Grafico 9*, le categorie che contribuiscono alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq nel modulo B4 sono Partizione interna, con il 40%, Chiusura, con il 32% e Attrezzatura esterna, con il 28%, mentre le Strutture non risultano responsabili di alcuna emissione in questa fase del ciclo di vita. Questo dato si giustifica considerando la vita utile dei materiali. Gli elementi strutturali – come pareti portanti, membrane sotto le strutture portanti o tubazioni interrato – sono componenti



destinati a durare quanto l'intero edificio ( $STR \geq 50$  anni), e quindi non necessitano di sostituzioni durante il ciclo di vita dell'edificio. Al contrario, l'elevato impatto ambientale associato alle Chiusure, alle Attrezzature esterne e alle Partizioni interne è attribuibile sia alla necessità di una o due sostituzioni nel corso della vita utile del manufatto, sia all'ampia quantità di elementi appartenenti a queste categorie.

Anche per il modulo B4 è stata condotta l'analisi per "key-materials", suddividendo dunque i dati nelle dodici "categorie di materiali": "Materiali metallici", "Materiali isolanti", "Materiali cementizi", "Materiali

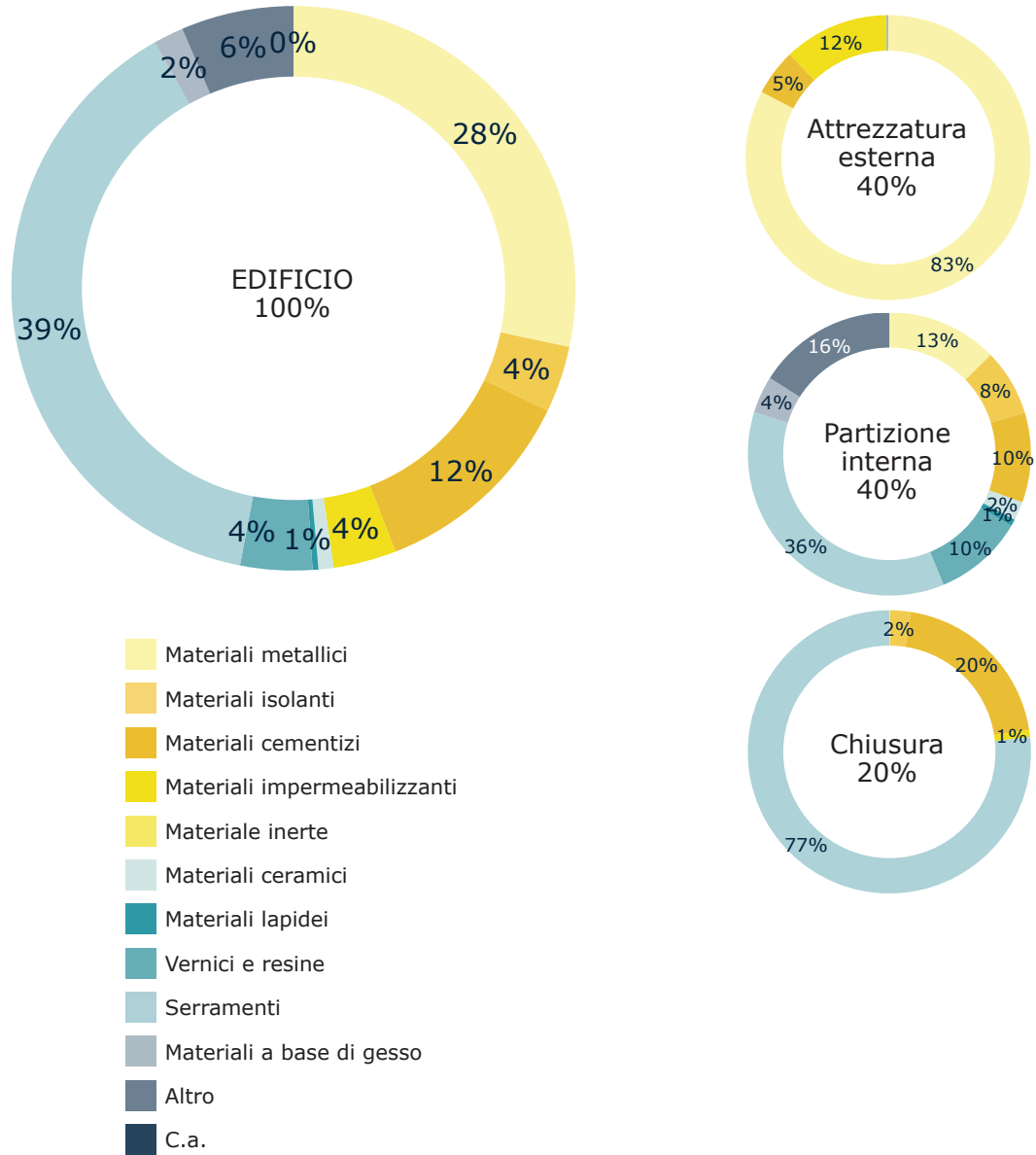
Tabella 38 - EC B4 per categorie di materiale

|                           | Strut. | Chius.  | Par.<br>interna | Att.<br>esterna | TOT     |
|---------------------------|--------|---------|-----------------|-----------------|---------|
| Materiali metallici       | 0,0    | 1,5     | 328,7           | 1.495,7         | 1.826,0 |
| Materiali isolanti        | 0,0    | 48,2    | 196,2           | 0,0             | 244,4   |
| Materiali cementizi       | 0,0    | 410,1   | 266,9           | 95,2            | 772,1   |
| Materiali imp.            | 0,0    | 17,4    | 0,0             | 215,7           | 233,1   |
| Materiale inerte          | 0,0    | 0,0     | 0,0             | 0,0             | 0,0     |
| Materiali ceramici        | 0,0    | 0,0     | 55,3            | 0,0             | 55,3    |
| Materiali lapidei         | 0,0    | 0,0     | 20,6            | 0,9             | 21,5    |
| Vernici e resine          | 0,0    | 0,0     | 265,9           | 0,0             | 265,9   |
| Serramenti                | 0,0    | 1.565,5 | 932,6           | 0,0             | 2.498,1 |
| Materiali a base di gesso | 0,0    | 0,0     | 109,8           | 1,4             | 111,2   |
| Altro                     | 0,0    | 0,0     | 414,5           | 1,3             | 415,9   |
| C.a.                      | 0,0    | 0,0     | 0,0             | 0,0             | 0,0     |
| TOT                       | 0,0    | 2.042,6 | 2.590,6         | 1.810,2         | 6.443,4 |

impermeabilizzanti", "Materiale inerte", "Materiali ceramici", "Materiali lapidei", "Vernici e resine", "Serramenti", "Materiali a base di gesso", "Calcestruzzo armato" e "Altro".

Come si può osservare in *Tabella 38* e nel *Grafico 10* i maggiori contributi alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq derivano dai "Serramenti", responsabili del 39% delle emissioni, dai "Materiali metallici", responsabili del 28% e da "Materiali cementizi", responsabili del 12%. Dopo aver identificato i materiali più impattanti a livello di emissioni per l'intero edificio CRIF21, è stato quindi analizzato come questi si distribuiscano tra le categorie Partizione interna, Attrezzatura esterna e Chiusura.

Grafico 10 - EC B4 per categorie di materiale



FASE DI FINE VITA (C1-C4)

Nella fase di Fine vita l’obiettivo è quello di contabilizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq che si verificano in seguito alle operazioni di “Demolizione” (C1), “Trasporto dei rifiuti” (C2) “Trattamento dei rifiuti” (C3) e “Smaltimento finale” (C4) in riferimento a un determinato scenario di dismissione del manufatto edilizio.

C1 - DEMOLIZIONE

Come si calcola.

La procedura di calcolo per la determinazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq associate alle operazioni di cantiere prevede il medesimo iter (in 5 step) indicato per determinare l’EC A5. In questa fase sono da includere le demolizioni “Preliminari alla costruzione dell’edificio” (DP), le demolizioni “In fase d’uso” dovute a operazioni di manutenzione, riparazione, sostituzione e riqualificazione (DU) e le demolizioni “A fine vita” (DEoL). In assenza delle informazioni richieste per il calcolo, la pubblicazione consente di adottare una stima semplificata, considerando il 10% delle emissioni che si verificano nella fase di produzione (A1-A3).

Come è stato svolto il calcolo.

Nel calcolo, non avendo informazioni circa i macchinari impiegati per le operazioni di demolizione dell’edificio, è stata considerato il 10% della fase di produzione (A1-A3).

Risultati fase.

Al termine del calcolo per il modulo di demolizione C1 è risultata un EC di 1.629,53 tCO<sub>2</sub>eq.

C2 - TRASPORTO DEI RIFIUTI

Come si calcola.

La procedura per il calcolo delle emissioni prodotte in fase di trasporto dei rifiuti verso il sito di trattamento/smaltimento è la medesima descritta nel paragrafo per il calcolo del modulo di trasporto al sito di costruzione (A4) [p.79].

Come è stato svolto il calcolo.

Per la valutazione del modulo C2 sono stati dunque operati i medesimi calcoli svolti per la contabilizzazione del modulo A4 ipotizzando questa volta una distanza di 50 km tra l’edificio e il sito di trattamento/smaltimento dei rifiuti. I trasporti sono stati valutati prendendo in considerazione tutti i rifiuti prodotti durante lo STR dell’edificio, dunque quelli legati alla fase di

costruzione (Construction waste- CW), quelli legati alle operazioni di sostituzione (Renovation waste- RW) e quelli prodotti durante il processo di demolizione dell’edificio (Demolition waste- DW).

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di “Trasporto dei rifiuti” C2 è risultata una EC di 229,81 tCO<sub>2</sub>eq  
In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono

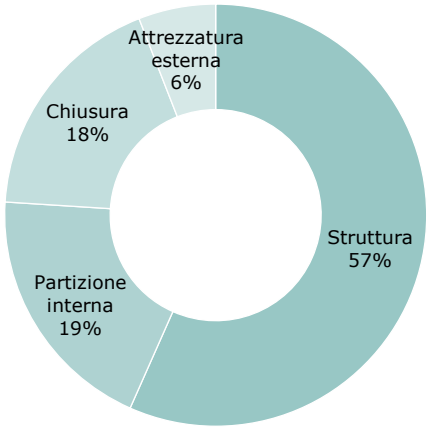
Tabella 39 - EC C2 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| C2                   | MASSA <sub>CW</sub><br>[t] | EC <sub>CW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | MASSA <sub>RW</sub><br>[t] | EC <sub>RW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | MASSA <sub>DW</sub><br>[t] | EC <sub>DW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | EC TOT<br>[tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Struttura            | 1.835,12                   | 4,35                                      | 0,00                       | 0,00                                      | 49.760,26                  | 125,83                                    | 130,17                          |
| Partizione interna   | 475,92                     | 1,55                                      | 5.276,38                   | 22,00                                     | 5.560,87                   | 20,93                                     | 44,47                           |
| Chiusura             | 333,15                     | 0,76                                      | 8.447,98                   | 23,12                                     | 6.636,21                   | 17,69                                     | 41,57                           |
| Attrezzatura esterna | 187,14                     | 0,54                                      | 2.058,59                   | 5,06                                      | 2.858,86                   | 7,99                                      | 13,59                           |
| TOTALE               | 2.831,33                   | 7,20                                      | 15.782,96                  | 50,17                                     | 64.816,21                  | 172,44                                    | 229,81                          |

Tabella 40 - EC C2 per unità di superficie

| AREA  | [m <sup>2</sup> ] | C2<br>[kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------|----------------------------------------------|
| GFA   | 27.500            | 8,4                                          |
| GIA   | 20.513            | 11,2                                         |
| NHA   | 10.129            | 22,7                                         |
| LA/UL | 10.478            | 21,9                                         |

Grafico 11 - EC C2 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290



gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle quattro categorie “Strutture”, “Partizione interna”, “Attrezzatura esterna” e “Chiusura”.

Come evidenziato dalla Tabella 39 e dal Grafico 11, la categoria che contribuisce maggiormente alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq nel modulo C2 è quella “Struttura”, con il 57%, seguono “Partizione interna”, con il 19%, “Chiusura”, con il 18% e infine “Attrezzatura esterna”, con il restante

6%.

La *Tabella 41* e il *Grafico 12* riportano anche la suddivisione delle emissioni associate al trasporto dei rifiuti derivanti dal trasporto dei rifiuti prodotti durante le diverse fasi del ciclo di vita dell’edificio: costruzione, uso e fine vita. La fase maggiormente impattante è quella di fine vita, con una quota di emissioni ( $EC_{DW}$ ) pari al 75%. Seguono le emissioni legate alle opere di sostituzione ( $EC_{RW}$ ), che rappresentano il 22%, e infine quelle dovute alla costruzione ( $EC_{CW}$ ), con un’incidenza del 3%.

Anche per il modulo C2 è stata condotta l’analisi per “key-materials”, suddividendo dunque i dati nelle dodici “categorie di materiali: “Materiali metallici”, “Materiali isolanti”, “Materiali cementizi”, “Materiali

Tabella 41 - EC C2 per categorie di materiale

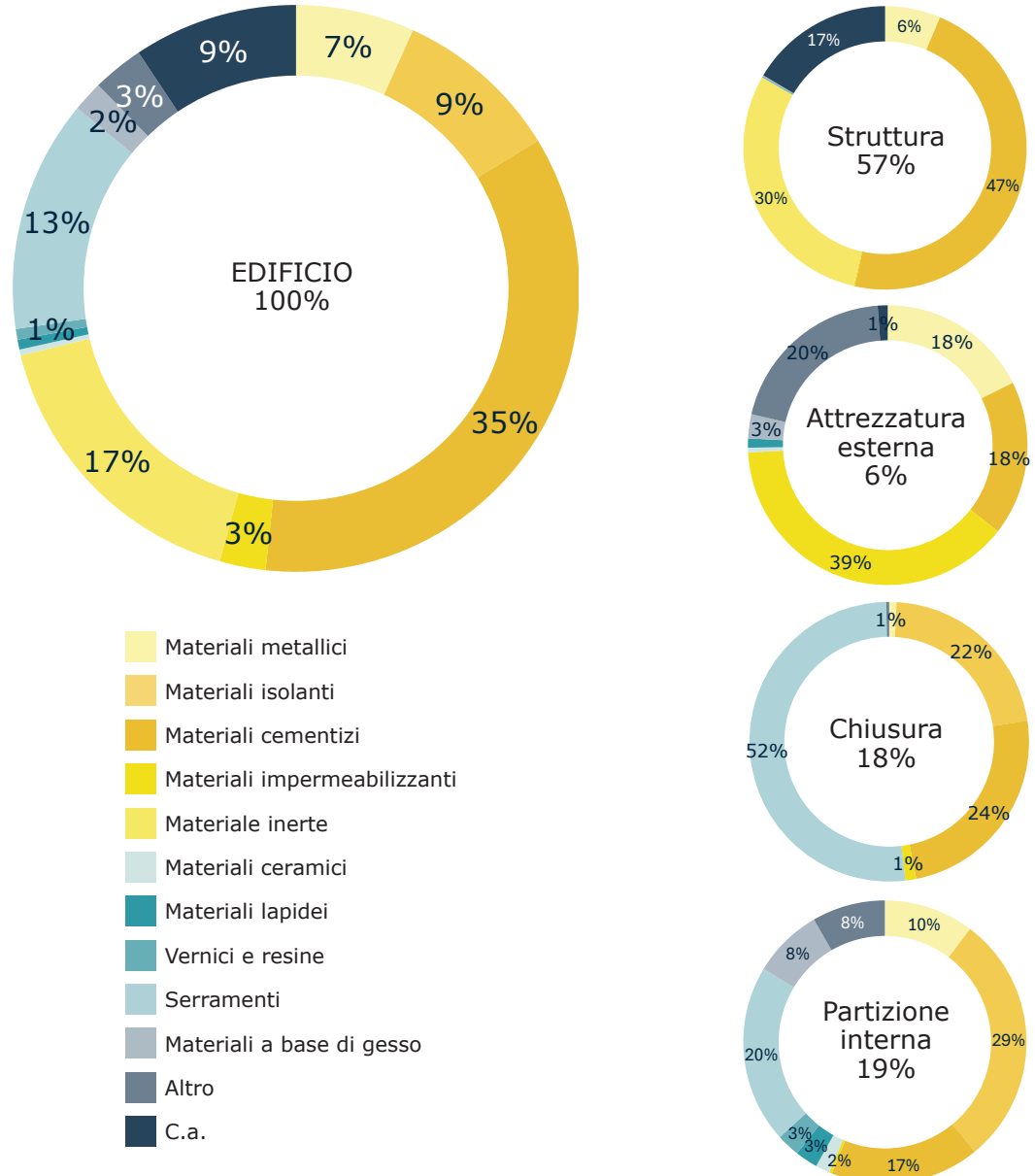
|                           | Strut. | Chius. | Par.<br>interna | Att.<br>esterna | TOT   |
|---------------------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-------|
| Materiali metallici       | 8,3    | 0,4    | 4,6             | 2,4             | 15,6  |
| Materiali isolanti        | 0,0    | 9,0    | 12,8            | 0,0             | 21,8  |
| Materiali cementizi       | 61,3   | 10,1   | 7,6             | 2,4             | 81,4  |
| Materiali imp.            | 0,1    | 0,5    | 0,1             | 5,2             | 6,1   |
| Materiale inerte          | 38,7   | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 38,7  |
| Materiali ceramici        | 0,0    | 0,0    | 0,7             | 0,1             | 0,8   |
| Materiali lapidei         | 0,0    | 0,0    | 1,2             | 0,1             | 1,3   |
| Vernici e resine          | 0,2    | 0,0    | 1,2             | 0,0             | 1,4   |
| Serramenti                | 0,0    | 21,4   | 9,0             | 0,0             | 30,5  |
| Materiali a base di gesso | 0,1    | 0,0    | 3,6             | 0,4             | 4,0   |
| Altro                     | 0,1    | 0,1    | 3,7             | 2,8             | 6,7   |
| C.a.                      | 21,4   | 0,0    | 0,0             | 0,2             | 21,6  |
| TOT                       | 130,2  | 41,6   | 44,5            | 13,6            | 229,8 |

impermeabilizzanti”, “Materiale inerte”, “Materiali ceramici”, “Materiali lapidei”, “Vernici e resine”, “Serramenti”, “Materiali a base di gesso”, “Calcestruzzo armato” e “Altro”.

In linea con quanto osservato per il modulo A4 i maggiori contributi alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq derivano da “Materiali cementizi”, responsabile del 35% delle emissioni, da “Materiale inerte”, responsabile del 17% e dai “Serramenti”, responsabili del 13%.

Dopo aver identificato i materiali più impattanti a livello di emissioni per l’intero edificio CRIF21, è stato quindi analizzato come questi si distribuiscano tra le categorie Partizione interna, Attrezzatura esterna e Chiusura.

Grafico 12 - EC C2 per categorie di materiale



C3-C4 TRATTAMENTO DEI RIFIUTI E SMALTIMENTO FINALE

Come si calcola.

Secondo quanto indicato nel documento "Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio", per la contabilizzazione dell'EC dei moduli C3 e C4 è necessario sviluppare degli scenari di gestione dei materiali che costituiscono il manufatto edilizio al termine dello scenario temporale di riferimento (STR). È pertanto necessario stabilire i tassi di recupero (%) rispetto ai quali impostare i differenti scenari di trattamento dei materiali, una volta che saranno classificati come rifiuti.

Il documento di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024) propone uno scenario "100%", in cui la totalità dei rifiuti è destinato allo smaltimento in discarica e a uno "70-30%" (o 2030) in cui il 70% dei rifiuti è sottoposto a processi di recupero e il restante 30% è destinato allo smaltimento in discarica.

- Il calcolo con metodo base prevede tre step sequenziali:
- 1. l'identificazione del quantitativo di rifiuto e del corrispondente tasso di recupero;
  - 2. il calcolo dell'ECC3+C4 dell'j-esimo rifiuto in relazione dello scenario di smaltimento, mediante la moltiplicazione fra la quantità di rifiuto e il relativo coefficiente di emissione legato allo smaltimento in discarica, al riciclo, alla termovalorizzazione o al compostaggio;
  - 3. il calcolo dell'ECC3+C4, mediante la somma dei singoli valori determinati per gli j-esimi rifiuti.

Per la valutazione EC C3-C4 è necessario tenere in considerazione la gestione di tutti i rifiuti prodotti durante lo STR, dunque sia di quelli legati alla fase di costruzione (Construction waste - CW), sia quelli legati alle operazioni di manutenzione, riparazione, sostituzione e riqualificazione (renovation waste - RW), sia quelli prodotti durante il processo di demolizione dell'edificio (demolition waste - DW).

Come è stato svolto il calcolo.

Nella valutazione dell'edificio CRIF21 è stato adottato lo "scenario 70-30%" proposto nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024). Come indicato, l'EC dei moduli C3 e C4 è stato contabilizzato sommando le emissioni prodotte durante le operazioni di riciclo e quelle emesse durante lo smaltimento in discarica. Le emissioni di CO<sub>2</sub>eq relative a entrambe le componenti sono state calcolate moltiplicando il quantitativo di materiale destinato alla discarica/riciclo per il relativo coefficiente di emissione specifico. Nel calcolo per il caso studio sono

stati utilizzati i fattori di emissione specifica dei rifiuti da costruzione presenti nel database BEIS, riportati nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024, p. 110).

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo di "Trattamento dei rifiuti" e "Smaltimento finale" C3-C4 è risultata una EC di 278,18 tCO<sub>2</sub>eq.

Tabella 42 - EC C3-C4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290

| C3-C4                | MASSA <sub>CW</sub><br>[t] | EC <sub>CW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | MASSA <sub>RW</sub><br>[t] | EC <sub>RW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | MASSA <sub>DW</sub><br>[t] | EC <sub>DW</sub><br>[tCO <sub>2</sub> eq] | EC TOT<br>[tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Struttura            | 1.835,12                   | 2,10                                      | 0,00                       | 0,00                                      | 49.760,26                  | 53,63                                     | 55,73                           |
| Partizione interna   | 475,92                     | 3,89                                      | 5.276,38                   | 23,83                                     | 5.560,87                   | 24,78                                     | 52,50                           |
| Chiusura             | 333,15                     | 0,84                                      | 8.447,98                   | 82,17                                     | 6.636,21                   | 46,26                                     | 129,27                          |
| Attrezzatura esterna | 187,14                     | 2,15                                      | 2.058,59                   | 18,76                                     | 2.858,86                   | 19,76                                     | 40,67                           |
| TOTALE               | 2.831,33                   | 8,98                                      | 15.782,96                  | 124,76                                    | 64.816,21                  | 144,44                                    | 278,18                          |

Tabella 43 - EC C3-C4 per unità di superficie

| AREA  | [m <sup>2</sup> ] | C3-C4<br>[kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ] |
|-------|-------------------|-------------------------------------------------|
| GFA   | 27.500            | 10,1                                            |
| GIA   | 20.513            | 13,6                                            |
| NHA   | 10.129            | 27,5                                            |
| LA/UL | 10.478            | 26,5                                            |

Grafico 13 - EC C3-C4 per unità tecnologiche in accordo con UNI:8290



In accordo con la classificazione degli elementi tecnici che costituiscono gli edifici presentata nella UNI 8290 (UNI 8290-1:1981 + A122:1983), ogni elemento/materiale considerato nel calcolo è stato inserito in una delle quattro categorie "Strutture", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

Come evidenziato dalla *Tabella 42* e dal *Grafico 13*, la categoria che contribuisce maggiormente alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq dei moduli C3-

C4 è quella "Chiusure", con il 46%, seguono "Struttura", con il 20%, "Partizione interna", con il 19%, e infine "Attrezzatura esterna", con il restante 15%.

La *Tabella 42* riporta la suddivisione delle emissioni associate al trattamento dei rifiuti prodotti durante le diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio: Costruzione, Uso e Fine Vita.

La fase di Fine Vita ( $EC_{DW}$ ) e quella di Uso ( $EC_{RW}$ ) sono quasi interamente responsabili delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq C3-C4, con una incidenza relativamente del 52% e del 45%.

Come esposto nella *Tabella 44* e nel *Grafico 14* anche per i moduli C3-C4 è stata condotta l'analisi per "key-materials", suddividendo dunque i

Tabella 44 - EC C3-C4 per categorie di materiale

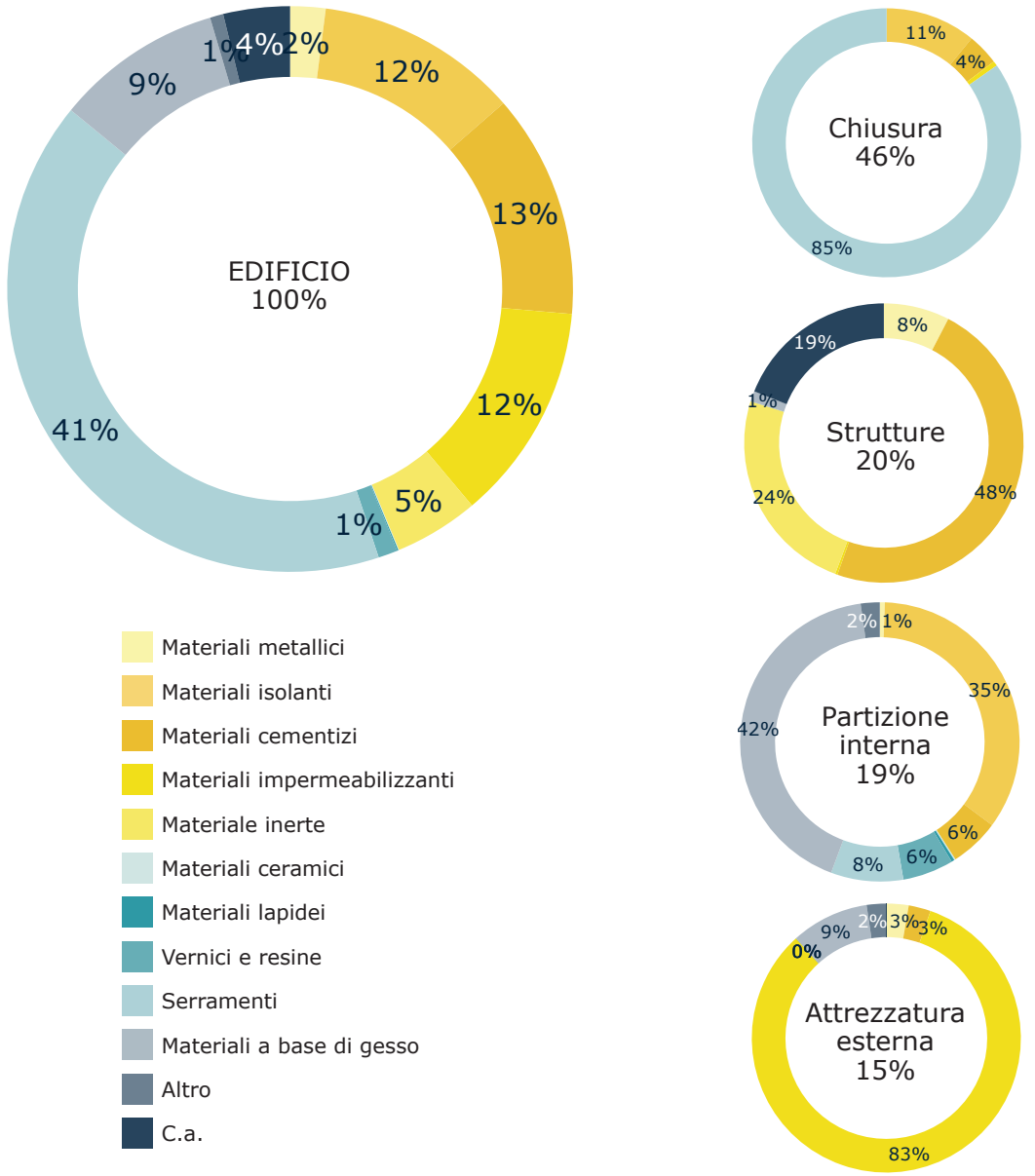
|                           | Strut. | Chius. | Par.<br>interna | Att.<br>esterna | TOT   |
|---------------------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-------|
| Materiali metallici       | 4,2    | 0,0    | 0,3             | 1,1             | 5,6   |
| Materiali isolanti        | 0,0    | 14,0   | 18,1            | 0,0             | 32,2  |
| Materiali cementizi       | 26,6   | 4,9    | 3,0             | 1,1             | 35,7  |
| Materiali imp.            | 0,2    | 0,8    | 0,0             | 33,7            | 34,6  |
| Materiale inerte          | 13,5   | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 13,5  |
| Materiali ceramici        | 0,0    | 0,0    | 0,1             | 0,0             | 0,1   |
| Materiali lapidei         | 0,0    | 0,0    | 0,2             | 0,0             | 0,2   |
| Vernici e resine          | 0,0    | 0,0    | 3,1             | 0,0             | 3,1   |
| Serramenti                | 0,0    | 109,5  | 4,4             | 0,0             | 113,9 |
| Materiali a base di gesso | 0,7    | 0,0    | 22,1            | 3,8             | 26,6  |
| Altro                     | 0,0    | 0,0    | 1,2             | 0,9             | 2,1   |
| C.a.                      | 10,6   | 0,0    | 0,0             | 0,0             | 10,6  |
| TOT                       | 55,7   | 129,3  | 52,5            | 40,7            | 278,2 |

dati nelle dodici "categorie di materiale": "Materiali metallici", "Materiali isolanti", "Materiali cementizi", "Materiali impermeabilizzanti", "Materiale inerte", "Materiali ceramici", "Materiali lapidei", "Vernici e resine", "Serramenti", "Materiali a base di gesso", "Calcestruzzo armato" e "Altro".

I maggiori contributi alle emissioni di CO<sub>2</sub>eq C3-C4 derivano da "Serramenti" (41%), da "Materiali cementizi" (13%), da "Materiali isolanti" (12%) e da "Materiali impermeabilizzanti" (12%).

Dopo aver identificato i materiali più impattanti a livello di emissioni per l'intero edificio CRIF21, è stato quindi analizzato come questi si distribuiscano tra le categorie "Struttura", "Partizione interna", "Attrezzatura esterna" e "Chiusura".

Grafico 14 - EC C3-C4 per categorie di materiale





Impianti

Rispetto alla valutazione dell’Embodied Carbon relativa alle “Opere civili” dell’edificio, la valutazione dell’EC degli impianti è stata condotta separatamente.  
Sono stati analizzati gli “impianti meccanici”, i “pannelli fotovoltaici (PV)” e gli “ascensori”.

Impianti meccanici

Nella valutazione dell’EC degli impianti meccanici sono stati inclusi gli elementi afferenti ai sistemi HVAC considerati rilevanti; sono state escluse invece tutte le componenti relative alla gestione dell’ACS, ai sistemi antincendio e alla distribuzione della geotermia.  
Ovunque fossero presenti elementi da usare come riferimento (EPD e Okobaudat) è stato utilizzato il “metodo base – dati medi generici” per i sistemi MEP proposto dal documento di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024) e descritto nel paragrafo 4.3 [p.36]. Tutti i riferimenti fornivano i valori A1-A3, C2, C3 e C4, mentre non sempre erano indicati quelli di A4 e B2, B3, B4. Per gli elementi privi di informazioni per il modulo A4 si è adottata la procedura di calcolo descritta nel paragrafo 5.2.2 [p. 79] per una distanza di 100 km; per i moduli B2, B3 e B4 invece è stato considerato il 10% del modulo di produzione.

Per le UTA è stato applicato il “metodo base – key material” descritto nel paragrafo 4.3, mediante l’utilizzo di 13 LCI di sistemi UTA.

Nella *Tabella 45* è riportato l’inventario con le percentuali legate ai principali materiali costituenti del modello tipo di UTA, individuato grazie all’analisi e alla media dei valori dei casi studio selezionati.  
Gli impatti dei materiali costituenti sono stati contabilizzati mediante l’utilizzo dei coefficienti di emissione specifica riportati nella *Tabella 46*. È stata considerata una vita utile dei sistemi UTA di 25 anni, pertanto nello STR dell’edificio (50 anni) questi sistemi sono soggetti a una sostituzione.

Tabella 45 - LCI del modello tipo di UTA

| MATERIALE | PERCENTUALE [%] |
|-----------|-----------------|
| Alluminio | 10,4            |
| Metallo   | 74,5            |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Plastica           | 3,8 |
| Materiali minerali | 5,9 |
| Other (Acciaio)    | 5,5 |
| Totale             | 100 |

Tabella 46 - Coefficienti di emissione specifica dei materiali per il modello tipo di UTA

| MATERIALE          | VALORE [kgCO <sub>2</sub> eq/kg] | PROVENIENZA DATO                                                    |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Alluminio          | 11,86                            | Media fra valori estratti dal Database ICE e dal Database ÖKOBAUDAT |
| Metallo            | 2,79                             |                                                                     |
| Plastica           | 4,41                             |                                                                     |
| Materiali minerali | 1,30                             |                                                                     |
| Other (Acciaio)    | 2,79                             |                                                                     |

Tabella 47 - WLC dei sistemi UTA presenti nell’edificio CRIF21 per una vita utile di 25 anni

| SISTEMA        | PESO  | EC [tCO <sub>2</sub> eq] |
|----------------|-------|--------------------------|
| UTA1-UTA2-UTA3 | 3025  | 25,65                    |
| Auditorium     | 1738  | 14,74                    |
| UTA CDA        | 905   | 7,67                     |
| TOTALE         | 5.668 | 48,1                     |

L’EC risultante per i sistemi UTA presenti nell’edificio CRIF21 è di 96,1 tCO<sub>2</sub>eq.

L’EC totale per la categoria “Impianti meccanici” è risultato di 2.556,41 tCO<sub>2</sub>eq.

Pannelli fotovoltaici

Le emissioni EC legate ai pannelli fotovoltaici presenti sulla copertura dell’edificio sono state stimate tramite l’utilizzo del modello “silicio mono-poli cristallino” descritto nel *Paragrafo 4.4.1*.  
Per il calcolo è stato necessario conoscere unicamente la quantità di m² di pannelli previsti per il progetto; il dato è stato ottenuto grazie alle informazioni presenti sul computo metrico relativo agli impianti elettrici e alle schede tecniche dei pannelli fotovoltaici impiegati nel progetto.

Nell’edificio CRIF21 sono state installate due diverse tipologie di pannelli fotovoltaici, ossia Bifacciale e Monofacciale. Avendo a disposizione i dati sulle dimensioni di un singolo pannello solo per la tipologia “Bifacciale” è stata utilizzata la stessa superficie anche per la tipologia “Monofacciale”.

Nel modello è considerata una vita utile dei pannelli fotovoltaici di 30 anni, nello STR dell’edificio (50 anni) questi sistemi sono soggetti a una sostituzione.

Tabella 48 - EC dei sistemi di ascensori presenti nell’edificio CRIF21 per una vita utile di 30 anni

| PANNELLO     | Quantità [n] | Area pannello singolo [m²] | Area totale pannelli [m²] | Peso [kg] | EC [tCO <sub>2</sub> eq] |
|--------------|--------------|----------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|
| Bifacciale   | 576          | 2,20                       | 1266,41                   | 20249,82  | 619,2                    |
| Monofacciale | 104          | 2,20                       | 228,66                    | 3656,22   | 111,8                    |

Al termine del calcolo l’EC totale dei pannelli fotovoltaici risulta di 1.462 tCO<sub>2</sub>eq.

Ascensori

Per le emissioni prodotte dagli ascensori è stato utilizzato il modello di calcolo descritto nel *Paragrafo 4.5.1*, il quale richiede, come dati di input per il calcolo:

- 1) il carico nominale che l’ascensore può sollevare (R);
- 2) il numero di piani che serve (F);
- 3) l’altezza di viaggio massima (H).

Nel progetto per l’edificio CRIF21 sono stati inseriti quattro sistemi di ascensori, per ognuno dei quali il computo metrico fornisce il carico nominale e il numero di piani serviti; l’altezza massima di viaggio di ogni sistema è stata invece ricavata dalle quote altimetriche presenti sulle planimetrie di progetto.  
Nella tabella *Tabella 49* si mostrano i dati di input inseriti per ogni ascensore e i relativi pesi (W) ed emissioni calcolate dal modello.

Tabella 49 - EC dei sistemi di ascensore presenti nell’edificio CRIF21

| ASCENSORE | R [kg] | F [n] | H [m] | W [kg]   | EC [tCO <sub>2</sub> eq] |
|-----------|--------|-------|-------|----------|--------------------------|
| 1         | 900    | 7     | 22,43 | 4410,81  | 33,91                    |
| 2         | 900    | 8     | 26,23 | 4.742,65 | 36,47                    |
| 3         | 900    | 8     | 26,23 | 4.742,65 | 36,47                    |
| 4         | 900    | 9     | 30,03 | 5.089,66 | 39,13                    |
| TOT       |        |       |       |          | 145,98                   |

L’EC totale per la categoria "Ascensori", dato dalla moltiplicazione delle emissioni dei sistemi ascensori per il numero di sostituzioni necessarie durante lo STR dell'edificio (una sostituzione in 50 anni) è risultato di 291,96 tCO<sub>2</sub>eq.

L’EC totale degli impianti, dato dalla somma delle emissioni degli "Impianti meccanici", degli "Pannelli fotovoltaici" e degli "Ascensori" è risultata di 4.310,33 tCO<sub>2</sub>eq.

5.2.3 Operational Carbon

La componente Operational carbon è costituita da due moduli, uno relativo al consumo di energia (B6) e uno a quello idrico (B7).  
Nello studio sono state considerate entrambe le componenti.

B6 – Operational energy

Questo modulo include le emissioni di CO<sub>2</sub>eq associate ai fabbisogni energetici di energia termica ed elettrica necessari al funzionamento del manufatto edilizio. (Andreotti & Giordano, 2024, p. 90)

## Come si calcola.

Secondo quanto illustrato nel documento di riferimento, nel processo di contabilizzazione devono essere inclusi tutti i sistemi di produzione di energia utili per il funzionamento dell'edificio, siano essi integrati nello stesso o dislocati in un'area esterna al sito di progetto. Inoltre, sono da considerare sia le fonti rinnovabili che quelle non rinnovabili.

In riferimento allo stadio di progettazione preliminare, si raccomanda di utilizzare per il calcolo il fabbisogno energetico dell'edificio, stimato tramite la modellazione energetica in regime semi stazionario o dinamico. Una volta quantificati i fabbisogni energetici del manufatto edilizio è necessario individuare le risorse energetiche che verranno utilizzate (energia elettrica da rete, da fonte rinnovabile, gas, ecc).

Nel calcolo, qualora sia presente una quota di energia da fonti rinnovabili è necessario stabilire in quale degli scenari proposti dal report rientra l'edificio oggetto di studio:

- l'energia prodotta viene consumata istantaneamente;
- l'energia prodotta viene immagazzinata in batterie;
- l'energia prodotta non viene utilizzata direttamente ma viene condivisa con la rete e successivamente re-importata nel manufatto;
- l'energia prodotta supera il fabbisogno del manufatto (surplus energetico).

In tutti gli scenari elencati, si ipotizza che il fabbisogno elettrico dell'edificio e la percentuale di energia prodotta dall'impianto sia costante per tutto lo scenario temporale (ignorando le variabili meteorologiche ed eventuali deficit di prestazione degli impianti produttivi). Gli scenari prevedono inoltre la distribuzione del fabbisogno annuo e della produzione fotovoltaica in maniera omogenea sui 12 mesi.

La contabilizzazione della quota di OC relativa alla rete nazionale può essere condotta secondo due scenari differenti:

- Lo scenario fisso prevede che i processi per la produzione di energia elettrica nazionale non mutino durante lo STR del manufatto edilizio, in questo caso si utilizza un fattore di emissione specifica  $f_{GHG}$  costante;
- Lo scenario variabile prevede che nei processi per la produzione di energia elettrica vi sia un progressivo utilizzo di risorse rinnovabili in sostituzione di quelle fossili, in questo caso si utilizzano differenti fattori di emissioni variabili, il cui valore decresce con il tempo.

Il calcolo OC per lo scenario fisso prevede la moltiplicazione del fabbisogno totale per il fattore di emissione ( $f_{GHG}$ ).

Il calcolo OC per lo scenario variabile prevede di fare riferimento a

quattro periodi temporali:

- M1, dalla progettazione/costruzione dell'edificio al 2030;
- M2, dal 2030 al 2040;
- M3, dal 2040 al 2050;
- M4, dal 2050 all'anno di fine vita del manufatto edilizio.

la contabilizzazione dell'OC mediante l'Equazione 4 prevede:

- l'individuazione del numero di anni afferenti a ognuno dei quattro periodi temporali ( $a_{M1}$ ,  $a_{M2}$ ,  $a_{M3}$ ,  $a_{M4}$ );
- il calcolo del fabbisogno energetico per ognuno dei quattro periodi temporali, tramite la moltiplicazione tra il numero di anni inclusi ( $a_{Mj}$ ) e il fabbisogno energetico annuo ( $OEE_{LE-j}$ );
- la moltiplicazione del fabbisogno totale di ognuno dei periodi per il corrispettivo fattore di emissione totale ( $f_{GHG}$ ), risultato per ogni periodo della somma tra il fattore di emissione variabile ( $f_{GHG-Mj}$ ) e il fattore di emissione per il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica ( $f_{GHG-Rj}$ ).

I valori ottenuti per i quattro periodi vanno poi sommati fra di loro per ottenere il valore di emissioni di cui è responsabile l'edificio durante il suo STR.

Equazione 4 - Calcolo dell'OC B5 per lo scenario variabile

$$OC_{BS-S} [kgCO_2eq] = \sum_{j=1}^n \left[ \begin{aligned} & \left( (OEE_{ELE-j} * a_{M1}) * (f_{GHG-M1} + f_{GHG-R}) \right) \\ & + \left( (OEE_{ELE-j} * a_{M2}) * (f_{GHG-M2} + f_{GHG-R}) \right) \\ & + \left( (OEE_{ELE-j} * a_{M3}) * (f_{GHG-M3} + f_{GHG-R}) \right) \\ & + \left( (OEE_{ELE-j} * a_{M4}) * f_{GHG-M4} \right) \end{aligned} \right]$$

## Come è stato svolto il calcolo.

Il fabbisogno energetico dell'edificio, pari a 1.370.398,88 kWh/anno, è stato ricavato dal report della simulazione energetica in regime dinamico fornito da Politecnica.

Nel progetto è prevista l'installazione di un parco fotovoltaico per la produzione elettrica in loco di 217.336,70 kWh/anno, corrispondente al 16% del fabbisogno annuo totale. Nello studio si è ipotizzato che non si verifichi mai una condizione di surplus energetico. Pertanto, tutta l'energia prodotta dal sistema fotovoltaico si prevede venga consumata istantaneamente (senza essere stoccata in batterie d'accumulo né ceduta alla rete e re-importata in un secondo momento) con un  $OC_{ELE-R}$  risultante di 0 kgCO<sub>2</sub>eq/anno.

Per valutare le emissioni di CO<sub>2</sub>eq legate alla quota di fabbisogno

rimanente (1.153.062,18 kWh/anno) è stato considerato l’allacciamento alla rete in uno scenario variabile, immaginando dunque una progressiva decarbonizzazione dei sistemi di produzione energetica nazionali. In *Tabella 50* si riportano i coefficienti  $f_{GHG}$  utilizzati nel calcolo per il caso studio, gli anni dello STR divisi fra i quattro periodi indicati dal report e le emissioni risultanti per ognuno di essi.

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo B6 è risultata un’OC di 7.042 tCO<sub>2</sub>eq.

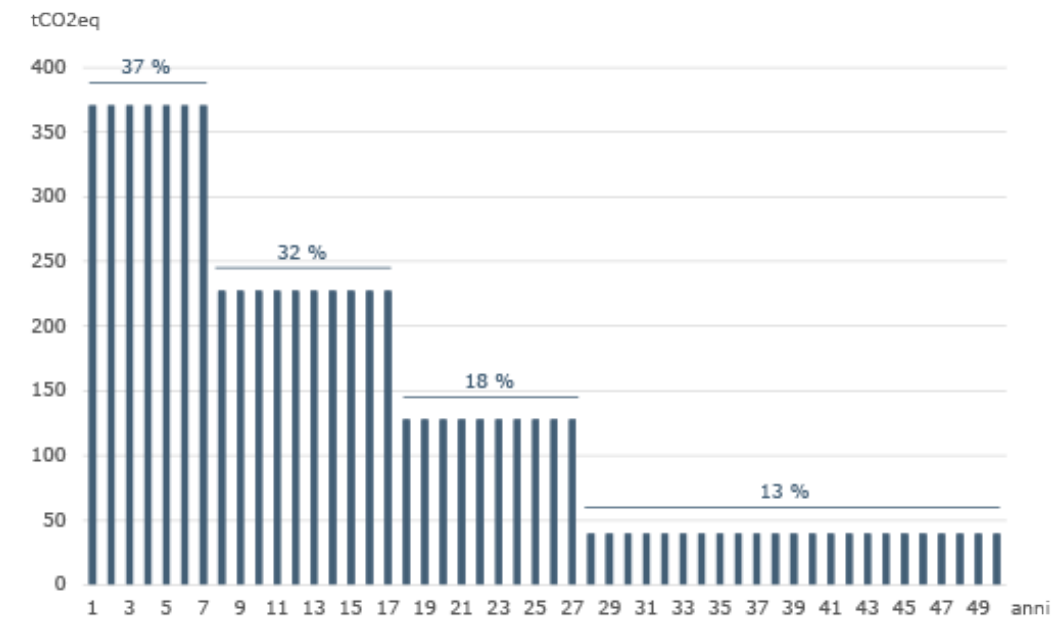
Tabella 50 - OC B6 con scenario variabile (in accordo con Andreotti & Giordano, 2024, p. 101)

|                                     |                                                                              | Periodi temporali (M)                              |         |         |                |                          |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------|---------|----------------|--------------------------|
|                                     |                                                                              | 1                                                  | 2       | 3       | 4              |                          |
|                                     |                                                                              | Progettazione e realizzazione del manufatto - 2030 | 2030    | 2040    | 2050-fine vita |                          |
| $f_{GHG} + (f_{GHG-M} + f_{GHG-R})$ | Fattore di emissione spcifica                                                | 0,32                                               | 0,19    | 0,11    | 0,03           | kgCO <sub>2</sub> eq/kWh |
| aM                                  | Numero di anni del periodo                                                   | 7                                                  | 10      | 10      | 23             | Anni                     |
| OC <sub>B6-SV annuo</sub>           | Operational Carbon del modulo B6 per la sola componente di energia elettrica | 370,4                                              | 226,7   | 127,5   | 39,4           | tCO <sub>2</sub> eq/anno |
| OC <sub>B6-SV tot</sub>             | da rete nazionale secondo scenario variabile                                 | 2.592,5                                            | 2.266,9 | 1.275,3 | 907,0          | tCO <sub>2</sub> eq      |

Tabella 51 - OC B6 per unità di superficie

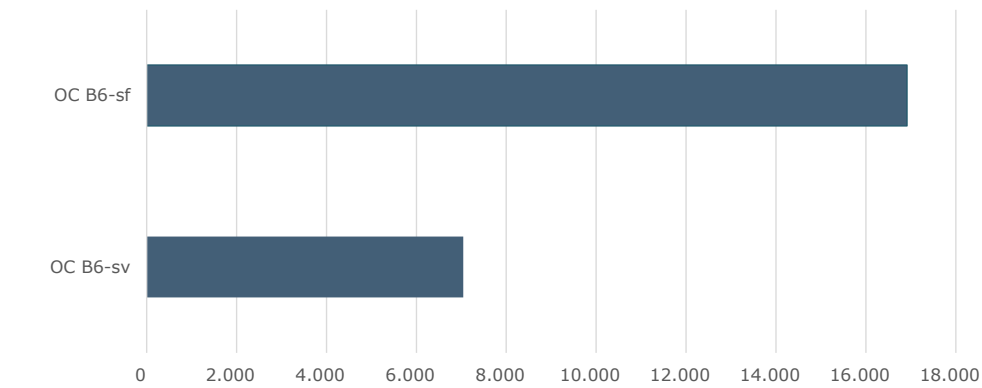
| AREA  | [m²]   | B6 <sub>sv</sub><br>[kgCO <sub>2</sub> eq/m²anno] |
|-------|--------|---------------------------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 5,1                                               |
| GIA   | 20.513 | 6,9                                               |
| NHA   | 10.129 | 13,9                                              |
| LA/UL | 10.478 | 13,4                                              |

Grafico 15 - Distribuzione dell’OC B6<sub>sv</sub> fra gli anni dello STR



Per valutare i benefici in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>eq derivanti dalla decarbonizzazione dei sistemi di produzione dell’energia, è stato calcolato anche il valore di CO<sub>2</sub>eq associato all’edificio in uno scenario di riferimento fisso. In tale scenario, il valore del parametro B6<sub>sf</sub> risulta pari a 16.909,66 tCO<sub>2</sub>eq. Come mostrato nel *Grafico 16* lo scenario variabile comporta un risparmio di 9.284,92 kgCO<sub>2</sub>eq, corrispondente al 58%.

Grafico 16 - Confronto fra le emissioni di CO<sub>2</sub>eq prodotte nello STR in uno scenario fisso e in uno variabile



B7 – OPERATIONAL WATER

Il modulo B7 comprende le emissioni CO<sub>2</sub>eq relative alla produzione di acqua bianca e allo smaltimento delle acque grigie e nere, misurate e/o previste nel corso della fase d’Uso del ciclo di vita del manufatto nonché gli impatti derivanti dall’impiego di prodotti e sostanze per il funzionamento del sistema idrico (Andreotti & Giordano, 2024).

Come si calcola.

Per il calcolo dell’OC B7, come mostrato nell’Equazione 5, il report indica di determinare i m<sup>3</sup> di acqua bianca in ingresso (mc<sub>B</sub>) e quelli di acqua nera e grigia in uscita (mc<sub>NG</sub>) dall’edificio ogni anno e moltiplicarli per il relativo fattore di emissione specifica f<sub>H2O-B</sub> e f<sub>H2O-NG</sub>.

Le acque nere e grigie sono intese come un’unica tipologia cui sono associate delle emissioni relative ai processi di trattamento delle acque reflue; nel caso in cui non vi siano dati disponibili sulle acque nere e grigie, si deve assumere che tutti i m<sup>3</sup> di acqua bianca in ingresso siano da destinare a operazioni di trattamento (ossia che mc<sub>B</sub>=mc<sub>NG</sub>).

Equazione 5 - Equazione per il calcolo dell’OCB7 (Andreotti & Giordano, 2024, p.105)

$$OC_{B7} = \sum_{j=1}^n (mc_B * f_{H2O-B}) + (mc_{NG} * f_{H2O-N}) \quad [kgCO_2eq/anno]$$

Come è stato svolto il calcolo.

Per il calcolo sono stati utilizzati i m<sup>3</sup> di consumo idrico stimati per l’edificio in fase preliminare (2.707 m<sup>3</sup>/anno) e, data la mancanza di informazioni circa le acque nere e grigie, si è ipotizzato che tutto il quantitativo di acqua bianca in ingresso debba essere oggetto di processi di trattamento. (vedere Tabella 52)

Risultati modulo.

Al termine del calcolo per il modulo B7 è risultata un’OC di 142,38 tCO<sub>2</sub>eq.

Risultati fase.

Il totale delle emissioni relative alla fase d’Uso, dato dalla somma della componente di EC e di quella OC è di 13.684,26 tCO<sub>2</sub>eq.

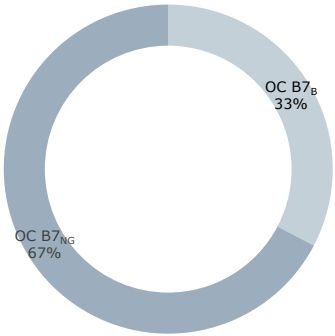
Tabella 52 - OC B7

| mc totale H2O<br>[m³/anno] | f <sub>H2O-B</sub><br>[kgCO2eq/m³ anno] | f <sub>H2O-NG</sub><br>[kgCO2eq/m³ anno] | OC B7 <sub>B</sub><br>[kgCO2eq/anno] | OC B7 <sub>NG</sub><br>[kgCO2eq/anno] | OC B7 <sub>TOTALE</sub><br>[kgCO2eq/anno] | Vita edificio<br>[anni] | OC B7<br>[tCO2eq] |
|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| 2.706,8                    | 0,3                                     | 0,7                                      | 931,1                                | 1.916,4                               | 2.847,5                                   | 50,0                    | 142,4             |

Tabella 53 - OC B7 per unità di superficie

| AREA  | [m²]   | B6 <sub>sv</sub><br>[kgCO <sub>2</sub> eq/<br>m²anno] |
|-------|--------|-------------------------------------------------------|
| GFA   | 27.500 | 0,1                                                   |
| GIA   | 20.513 | 0,1                                                   |
| NHA   | 10.129 | 0,3                                                   |
| LA/UL | 10.478 | 0,3                                                   |

Grafico 17 - incidenza delle emissioni OC B7 relative alle acque bianche (B) e di quelle relative alle acque grigie e nere (NG)





### 5.2.4 Risultati e discussione

In *Tabella 54*, è mostrata la sintesi dei risultati presentati nei precedenti paragrafi. Al termine della valutazione WLC si osserva che il valore finale di WLC è di 37.981,2 tCO<sub>2</sub>eq. Questo valore è composto da un'EC di 30.797,1 tCO<sub>2</sub>eq e da un'OC di 7.184,1 tCO<sub>2</sub>eq.

Come si può osservare dalla tabella la quantificazione EC legata agli elementi dell'edificio, che rientrano nella categoria "opere civili", è stata condotta per fasi e moduli. Per la contabilizzazione EC legata agli impianti, come descritto nei precedenti capitoli, sono state utilizzate invece delle metodologie semplificate che, sebbene tengano conto di tutto il ciclo di vita degli elementi, non consentono una suddivisione delle emissioni tra fasi e moduli ma solo di ottenere un valore aggregato.

Come mostrato in *Tabella 55* sono stati calcolati i pesi dei diversi moduli riferiti agli elementi “opere civili” rispetto al loro EC totale. Al fine di superare i limiti di una procedura semplificata di valutazione dei MEP (TM65, 2021), le percentuali derivanti dall’EC dell’edificio sono state impiegate per ridistribuire gli impatti dei tre sistemi di impianto oggetto di studio.

I moduli più impattanti sono quelli relativi alla fase di Produzione (A1, A2, A3), con il 62% di incidenza; seguono il modulo di sostituzione (B4), che pesa il 24% e quello di demolizione, con il 6%.

Le emissioni di CO<sub>2</sub>eq relative alle quattro fasi considerate nello scenario "cradle to grave", date dall'unione dell'EC delle opere civili, dell'EC pesata degli impianti e dell'OC sono riportati in *Tabella 56*.

Nel *Grafico 18* è possibile osservare che i sistemi MEP considerati nella valutazione del CRIF21 sono responsabili del 14 % dell'EC dell'edificio.

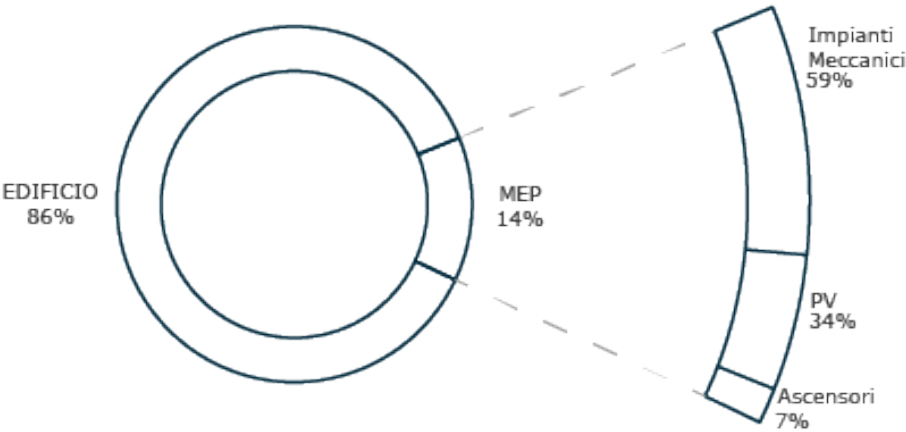
Tabella 54 - Sintesi delle emissioni di cui è responsabile l'edificio CRIF21 nello scenario "cradle to grave" (fonte: elaborazione dell'autore su indicazioni Figura 1.3 (Andreotti & Giordano,2024))

| CICLO DI VITA DI UN MANUFATTO EDILIZIO   |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Embodied Carbon<br>[tCO <sub>2</sub> eq] |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| OC<br>[tCO <sub>2</sub> eq]              |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| USO                                      |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| B6B7                                     |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| EDIFICIO                                 | Operational energy |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                          | Operational carbon |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                          | 7.624,7142,4       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                          | I. MECC.           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                          | ASC.               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PV                                       | 1.462,0            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                          | 2.556,4            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tot EC                                   |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 30.797,11                                |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tot OC                                   |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7.184,1                                  |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| +                                        |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 37.981,2                                 |                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 55 - Allocazione d'impatto degli impianti sulla base delle incidenze percentuali delle opere civili

| MODULI<br>EC | EDIFICIO<br>(Opere civili) |     | IMPIANTI              |                       |                       | WLC<br>EC edificio +<br>EC impianti |
|--------------|----------------------------|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
|              |                            |     | I. MECC.              | ASCENS.               | PV                    |                                     |
|              | [tCO <sub>2</sub> eq]      | %   | [tCO <sub>2</sub> eq] | [tCO <sub>2</sub> eq] | [tCO <sub>2</sub> eq] | [tCO <sub>2</sub> eq]               |
| A1-A3        | 16.295,26                  | 62  | 1.572,76              | 179,62                | 899,43                | 18.947,07                           |
| A4           | 668,45                     | 3   | 64,52                 | 7,37                  | 36,90                 | 777,23                              |
| A5           | 738,58                     | 3   | 71,29                 | 8,14                  | 40,77                 | 858,78                              |
| B2           | 177,02                     | 1   | 17,09                 | 1,95                  | 9,77                  | 205,83                              |
| B3           | 26,55                      | 0   | 2,56                  | 0,29                  | 1,47                  | 30,87                               |
| B4           | 6.443,40                   | 24  | 621,89                | 71,03                 | 355,65                | 7.491,96                            |
| C1           | 1.629w,53                  | 6   | 157,28                | 17,96                 | 89,94                 | 1.894,71                            |
| C2           | 229,81                     | 1   | 22,18                 | 2,53                  | 12,68                 | 267,21                              |
| C3-C4        | 278,18                     | 1   | 26,85                 | 3,07                  | 15,35                 | 323,45                              |
| TOT          | 26.486,78                  | 100 | 2.556,41              | 291,96                | 1.461,95              | 30.981,24                           |

Grafico 18 - Peso relativo delle componenti "Edificio (Opere civili)", "Impianti meccanici", "Pannelli fotovoltaici (PV)" e "Ascensori" rispetto all' EC totale



Per ogni fase si mostra nel *Grafico 19* il peso rispetto alla WLC e l'incidenza dei relativi moduli all'interno di ogni fase.

La fase maggiormente impattante in termine di emissione di gas climalteranti è quella di Produzione, con il 50%, seguita da quella d'Uso, con il 39%, da quella di Fine Vita, con il 7% e da quella di Costruzione, responsabile del restante 4%.

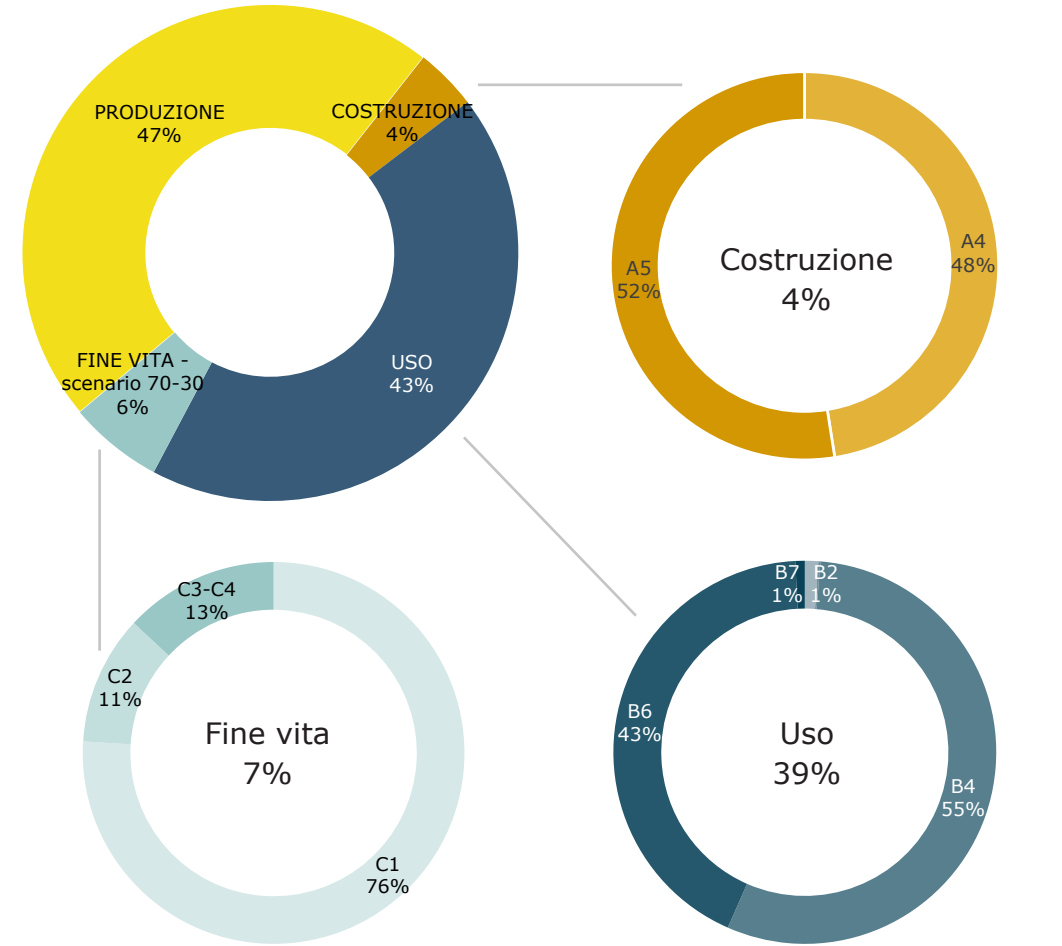
I due moduli di Costruzione (A4 e A5) sono responsabili quasi equamente delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq di cui è responsabile la Fase. Nella fase d'Uso, gli impatti sono dovuti per il 47% dall'OC, in virtù dell'energia utilizzata per sopperire al fabbisogno energetico dell'edificio, e per il 50% dalle attività di sostituzione.

Nella Fase di Fine Vita, l'impatto maggiore è dovuto alle operazioni di demolizione, che pesano il 76%.

Tabella 56 - Emissioni di CO<sub>2</sub>eq per fasi

| Fasi        | Moduli inclusi             | tCO <sub>2</sub> eq |
|-------------|----------------------------|---------------------|
| Produzione  | A1-A3                      | 18.947,07           |
| Costruzione | A4, A5                     | 1.636,01            |
| Uso         | B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 | 14912,80            |
| Fine Vita   | C1, C2, C3-C4              | 2.485,36            |
| TOT         |                            | 37.981,24           |

Grafico 19 - Incidenza delle fasi e dei relativi moduli nella WLC dell'edificio CRIF21



Per facilitare il confronto e l'utilizzo dei risultati WLC del caso di studio nella *Tabella 57* vengono riportati i valori in termini di  $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$  per ogni fase del ciclo di vita dell'edificio (Produzione, Costruzione, Uso, Fine Vita). Le emissioni vengono restituite per quattro diverse superfici di riferimento, al fine di facilitarne l'utilizzo e il confronto anche a livello internazionale.

Tabella 57 - Emissioni di  $\text{CO}_2\text{eq}$  per unità di superficie

|                           | TIPOLOGIA<br>DI AREA | SUPERFICIE<br>[ $\text{m}^2$ ] | PRODUZIONE<br>[ $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ] | CONSTRUZIONE<br>[ $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ] | USO<br>[ $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ] | FINE VITA<br>[ $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ] | WLC<br>[ $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ] |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Edificio<br>+<br>impianti | GFA                  | 27.500                         | 689,0                                          | 59,5                                             | 542,3                                   | 90,4                                          | 1.381,1                                 |
|                           | GIA                  | 20.513                         | 923,7                                          | 79,8                                             | 727,0                                   | 121,2                                         | 1.851,6                                 |
|                           | NHA                  | 10.129                         | 1.870,5                                        | 161,5                                            | 1.472,2                                 | 245,4                                         | 3.749,6                                 |
|                           | LA/UL                | 13.440                         | 1.409,8                                        | 121,7                                            | 1.109,6                                 | 184,9                                         | 2.826,1                                 |
| Solo Edificio             | GFA                  | 27.500                         | 592,6                                          | 51,2                                             | 502,9                                   | 77,7                                          | 1.224,4                                 |
|                           | GIA                  | 20.513                         | 794,4                                          | 68,6                                             | 674,3                                   | 104,2                                         | 1.641,5                                 |
|                           | NHA                  | 10.129                         | 1.608,7                                        | 138,9                                            | 1.365,4                                 | 211,0                                         | 3.324,1                                 |
|                           | LA/UL                | 13.440                         | 1.212,5                                        | 104,7                                            | 1.029,1                                 | 159,0                                         | 2.505,4                                 |

Nel *Grafico 20* e nella *Tabella 58* è riportata la distribuzione delle emissioni di  $\text{CO}_2\text{eq}$  nel corso dello STR dell'edificio, dalla messa in funzione dell'edificio nel 2023, sino alla dismissione nel 2072. Oltre allo STR di 50 anni (2023-2072) è stato inserito un anno precedente al 2023 in cui sono state ipotizzate le fasi di Produzione e di Costruzione.

Come si può osservare, sia nel Grafico che nella Tabella, la maggior quota delle emissioni, pari al 54%, viene prodotta prima della messa in funzione dell'edificio, a causa delle operazioni di:

- Estrazione delle risorse, Trasporto al sito di costruzione e Realizzazione

dei prodotti finiti o semilavorati (A1-A3)

- Trasporto al sito di costruzione (A4) e Costruzione dell'edificio (A5)
- Gestione degli scarti e delle eccedenze (C2w-C3w-C4w).

Dall'inizio dell'Uso (2023) sino alla Demolizione (2072), ogni anno, sono previste delle emissioni legate all'OC, composte da una quota fissa (B7) e da una progressivamente decrescente nel tempo in virtù della progressiva decarbonizzazione dei sistemi di produzione dell'energia elettrica nazionale (B6).

A queste emissioni, nel 2042, nel 2047, nel 2052 e nel 2062 si aggiungono quelle legate alle opere di sostituzione (B4) e alla gestione dei relativi rifiuti (C2, C3-C4). Il 2042 influisce in totale con il 4% delle emissioni, il 2047 con il 2%, il 2052 con l'12% e il 2062 con il 4%.

Le componenti di Manutenzione (B2) e Riparazione (B3) sono state distribuite omogeneamente fra gli anni che costituiscono il periodo di attività dell'edificio, ossia fra il 2023 e il 2072.

L'ultimo anno dello STR (2072), durante il quale sono stati inseriti la Demolizione dell'edificio (C1) e il Trattamento/Smaltimento dei rifiuti (C2, C3-C4), è responsabile del 6% delle emissioni totali.

Grafico 20 - Distribuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq tra gli anni dello scenario temporale di riferimento dell'edificio CRIF21 (STR=50 anni)

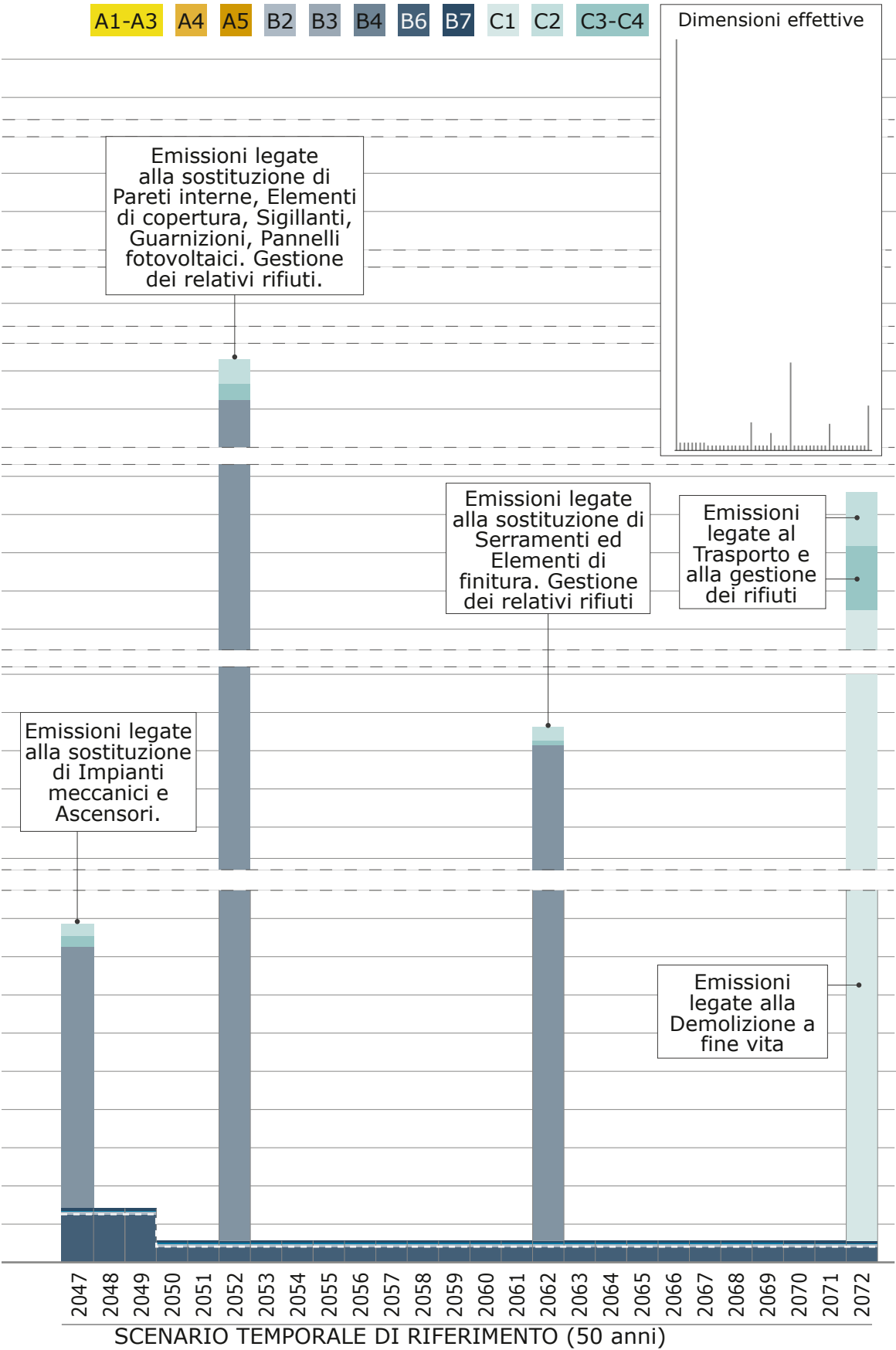
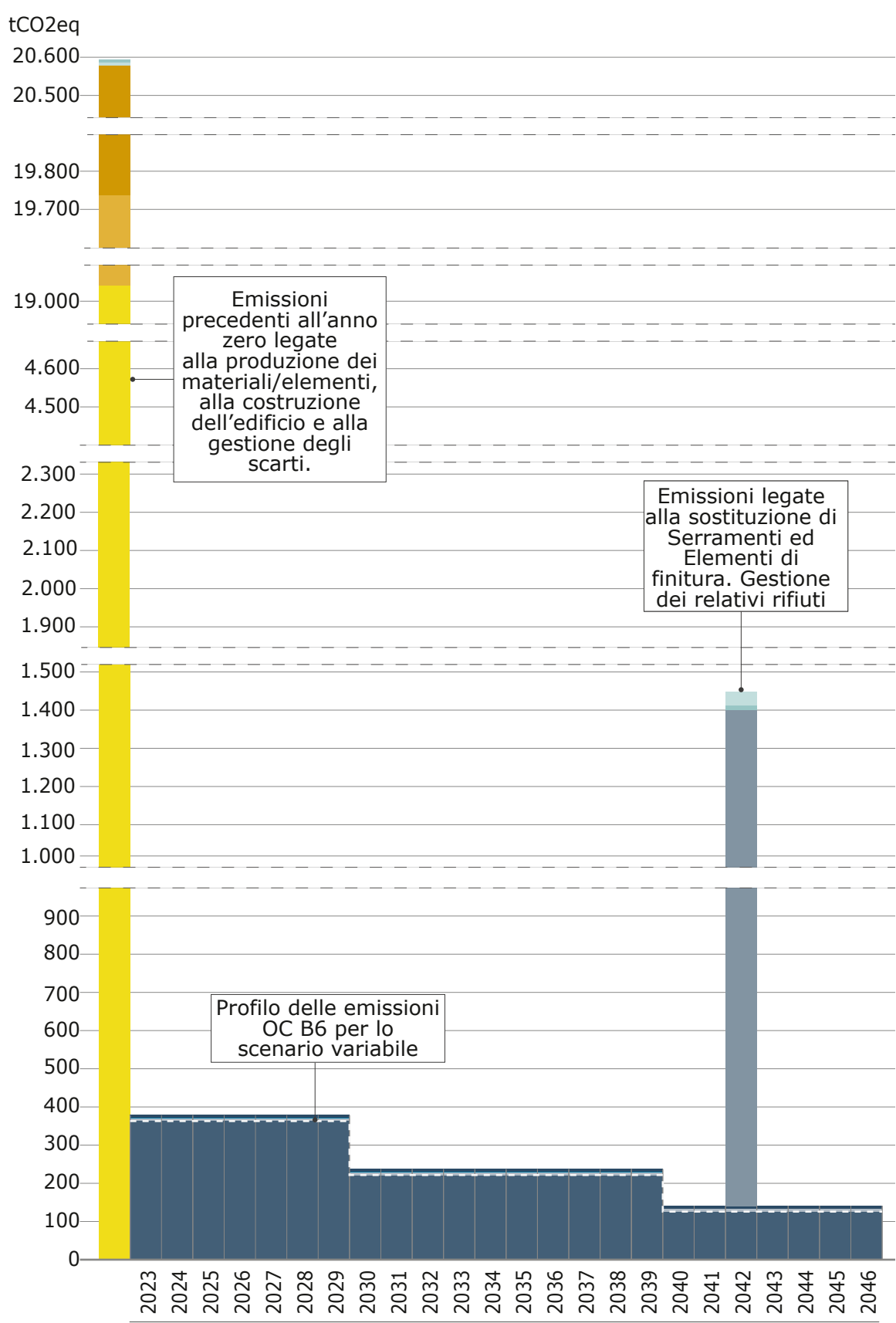


Tabella 58 - Distribuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq tra gli anni dello scenario temporale di riferimento dell'edificio CRIF21 (STR=50 anni)

| Scenario temporale di riferimento(STR) |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                        | 2022   | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 |
| A1-A3                                  | 18.947 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| A4                                     | 777    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| A5                                     | 859    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| B2                                     |        | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    |
| B3                                     |        | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
| B4                                     |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 1265 |      |      |      |      |
| B6                                     |        | 370  | 370  | 370  | 370  | 370  | 370  | 370  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 227  | 128  | 128  | 128  | 128  | 128  | 128  | 128  |
| B7                                     |        | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| C1                                     |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| C2                                     | 7      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 11   |      |      |      |      |
| C3-C4                                  | 9      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 38   |      |      |      |      |
| TOT                                    | 20.599 | 378  | 378  | 378  | 378  | 378  | 378  | 378  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 234  | 135  | 135  | 877  | 135  | 135  | 135  | 135  |
|                                        |        | 54   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0    | 0    | 4    | 0    | 0    | 0    | 0    |

[illegible]



Il confronto con benchmark internazionali sul carbonio incorporato rappresenta uno strumento importante per valutare l'impatto ambientale di un edificio e per verificare l'allineamento di un progetto agli obiettivi europei di neutralità climatica.

A tal fine, la rete britannica LETI (Low Energy Transformation Initiative) - tramite il documento *Embodied Carbon Primer* (LETI, 2020) - propone un sistema di classificazione a lettere (da A a E), che consente di inquadrare le prestazioni ambientali degli edifici in funzione dell'intensità di emissioni di CO<sub>2</sub>eq per m<sup>2</sup> di superficie lorda di pavimento (Gross Internal Floor Area - GIFA).

Il sistema distingue due principali livelli di valutazione:

- L'"Upfront Embodied Carbon", che comprende le emissioni EC relative ai moduli A1-A5 (Fasi di Produzione e Costruzione);
- Il "Life Cycle Embodied Carbon", che include tutte le emissioni EC legate all'intero ciclo di vita utile dell'edificio, ossia i moduli A1-A5 (Fasi di Produzione e Costruzione), B1-B5 (Fase d'Uso) e C1-C4 (Fase di Fine Vita).

Nel caso dell'edificio per uffici CRIF 21 (GIFA = 20.513 m<sup>2</sup>) l'analisi dell'EC (escludendo il contributo EC dei MEP) ha evidenziato i seguenti risultati:

- un "Upfront Embodied Carbon" (A1-A5) di 863 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, che colloca l'edificio nella fascia E secondo la classificazione LETI (*Grafico 22*);
- un "Life Cycle Embodied Carbon" (A1-C4) di 1.291 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, corrispondente alla fascia E (*Grafico 22*).

Come illustrato nel *Grafico 23*, l'edificio CRIF 21, realizzato tra il 2020 e il 2023, si inserisce nella media nazionale del Regno Unito per edifici costruiti nello stesso periodo, che tende verso la fascia E. Il progetto si colloca dunque al di sopra dei target di decarbonizzazione, che richiederebbero un progressivo spostamento verso le fasce A e B entro il 2030.

Grafico 22 - Posizionamento dell'edificio CRIF21 nella scala di valutazione LETI

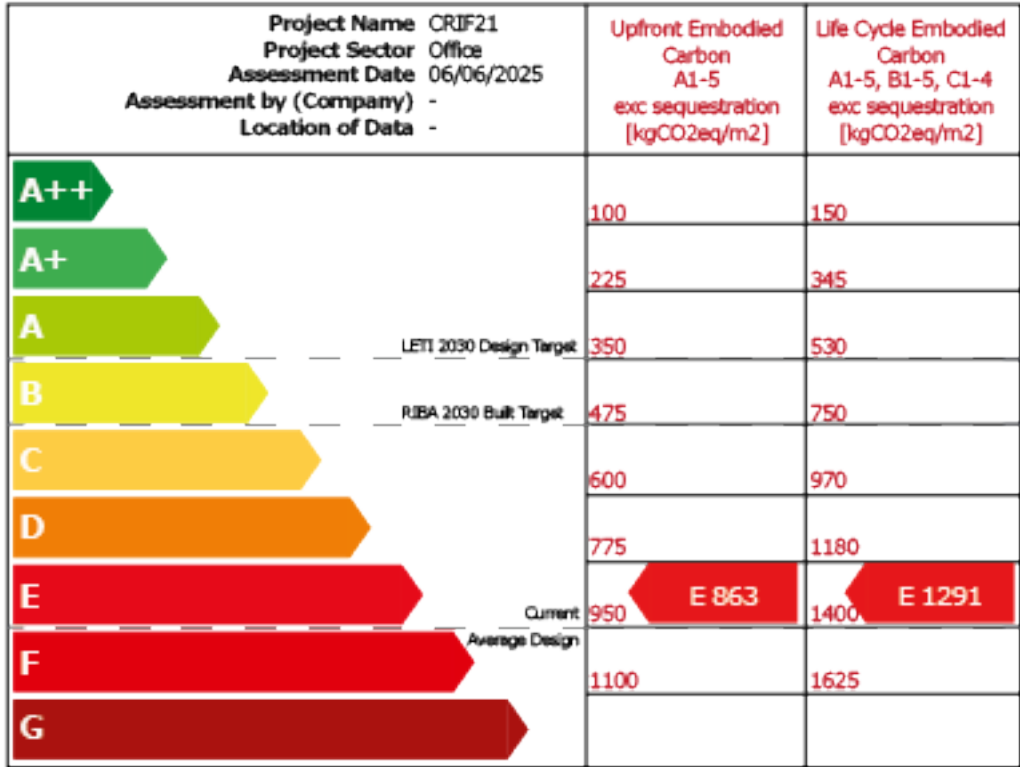
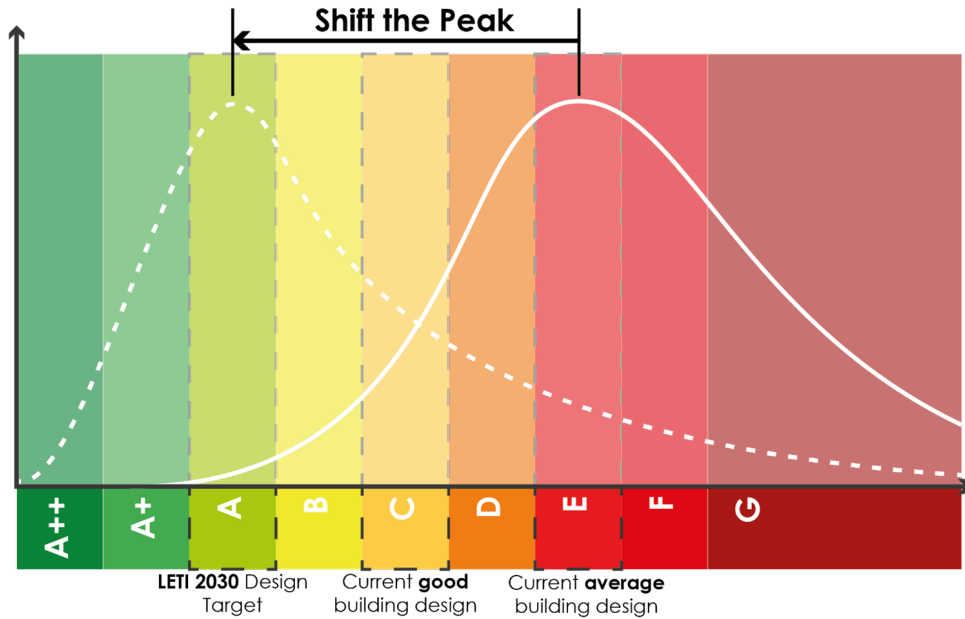


Grafico 23 - Intervallo di prestazioni basato su progetti di riferimento (fonte: LETI, 2021)



## 6. CONCLUSIONI

Gli obiettivi perseguiti dalla tesi di laurea magistrale si inseriscono nel quadro delle strategie europee per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni. In linea con la recente *Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici EPBD* (UE 2024/1275), il lavoro di ricerca ha affrontato la contabilizzazione delle emissioni di gas climalteranti nel ciclo di vita di un manufatto edilizio.

In quest'ottica, il primo obiettivo ha riguardato la validazione della metodologia italiana di calcolo della Whole Life Carbon (WLC) sviluppata da GBC Italia e dal Politecnico di Torino all'interno del progetto europeo *Buildinglife*.

L'attività di ricerca ha così previsto di applicare la suddetta metodologia a un caso di studio, l'edificio per uffici CRIF21 sito a Bologna, valutandone le emissioni di CO<sub>2</sub>eq lungo il suo ciclo di vita. Il risultato, tenuto conto dello scenario temporale di riferimento dello studio pari a 50 anni, ha restituito un valore di WLC corrispondente a 37.981,24 tCO<sub>2</sub>eq.

L'esito, se confrontato con il sistema di classificazione della performance ambientale realizzato da LETI, si colloca nella fascia E, evidenziando una significativa distanza dagli obiettivi di neutralità climatica fissati a livello europeo.

Le attività condotte nell'ambito del primo obiettivo della tesi hanno messo in luce alcuni limiti connessi all'applicazione della metodologia redatta da GBC Italia e dal Politecnico di Torino, riconducibili alla mancanza di dati e informazioni. Più nel dettaglio:

- carenza di un database nazionale da cui attingere valori di Embodied Carbon (EC), o Global Warming Potential (GWP), per materiali, prodotti, componenti tecnici e di impianto;
- complessità di contabilizzazione di alcuni moduli del ciclo di vita, specialmente quello relativo alla costruzione del manufatto (A5).

Di conseguenza, i limiti non sono dovuti a un problema metodologico bensì a un ritardo nella politica italiana nel recepire la valutazione WLC e a procedure progettuali non ancora allineate con gli studi sul ciclo di vita dei manufatti edilizi.

Un secondo obiettivo è stato rivolto alla definizione di una metodologia di supporto al progettista per la stima preliminare dell'EC degli impianti meccanici ed elettrici comunemente presenti negli edifici.

Sono stati elaborati quattro modelli di calcolo, due riferiti ai pannelli fotovoltaici (PV), uno ai pannelli solari termici (ST) e uno agli ascensori. Tali modelli sono stati sviluppati seguendo l'infrastruttura metodologica illustrata dalla pubblicazione (Andreotti & Giordano, 2024), a sua volta basata sulla procedura descritta nella TM65 (CIBSE, 2021).

Per ciascun impianto è stato configurato un modello tipo, qui inteso come

il risultato dei bilanci di massa (materiali che costituiscono l'impianto) di una serie di casi di studio reperiti sulle pagine web dei produttori, sui database di raccolta dei documenti EPD e sulle principali piattaforme di divulgazione scientifica. A partire da tali modelli, sono stati eseguiti gli step di calcolo in accordo con la metodologia di riferimento.

Il risultato ha portato allo sviluppo di strumenti parametrici semplificati su base Excel, in grado di fornire stime preliminari delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq in funzione delle caratteristiche progettuali di base degli impianti. Anche in questo caso il lavoro di ricerca ha messo in luce una serie di problematiche connesse alla mancanza di dati e informazioni, suddivisibili su più livelli:

- Livello 1 - composizione dei sistemi di impianto;
- Livello 2 - fattori di emissione specifica dei materiali che costituiscono il sistema di impianto;
- Livello 2bis - fattori di emissione specifica riferiti al contesto nazionale;
- Livello 3 - variabilità della gamma di prodotti presa in esame.

Inoltre, è opportuno segnalare che i modelli sviluppati tengono conto del solo elemento terminale e non dell'insieme di componenti necessari per il funzionamento globale dell'impianto (dorsali, unità di accensione/spegnimento, ecc). Di conseguenza, si evidenzia una complessità nell'indagare l'EC dei sistemi di impianto che richiede lo sviluppo di procedure semplificate.

In conclusione, al fine di agire concretamente verso la diminuzione delle emissioni di gas climalteranti di cui è responsabile un edificio, risulta necessario operare una serie di valutazioni WLC, partendo dalla fase di progettazione preliminare. In questa fase, infatti, è possibile apportare con maggior facilità modifiche significative al progetto nell'ottica di selezionare materiali, prodotti, componenti tecnici e di impianto che consentano di ridurre l'emissione di CO<sub>2</sub>eq nel ciclo di vita del manufatto edilizio.

Le metodologie di calcolo presentate nella pubblicazione di riferimento (Andreotti & Giordano, 2024) costituiscono un quadro operativo nel quale confluiscono alcuni studi e strumenti europei, contestualizzati sul territorio italiano, con i quali orientare la progettazione verso scelte a basse emissioni di carbonio.

Tuttavia, per una reale applicazione su larga scala delle metodologie analizzate, emerge con chiarezza la necessità di disporre di dati EC o GWP generici, validi per le prime fasi di progettazione. Ciò richiede il coinvolgimento attivo non solo delle aziende produttrici, chiamate a condurre studi Life Cycle Assessment (LCA) e a rendere disponibili i propri dati ambientali, ma anche dei decisori politici che, attraverso appositi strumenti di indirizzo, possono facilitare il recepimento degli

studi WLC.

Sarebbe inoltre auspicabile avviare studi finalizzati alla caratterizzazione delle principali tipologie di cantiere, al fine di elaborare valori medi rappresentativi dell'impiego e dell'efficienza dei macchinari da costruzione.

Infine, sebbene gli strumenti proposti nella tesi per la contabilizzazione dell'EC negli impianti siano attualmente limitati a specifici sistemi, un loro futuro ampliamento ad altre tecnologie potrebbe costituire un supporto prezioso per il progettista. Tali strumenti potranno infatti contribuire a una progettazione più consapevole e allineata agli obiettivi di decarbonizzazione definiti a livello europeo e nazionale per la transizione ecologica degli edifici.

## **7. APPENDICE: Analisi statistica**

FINALITÀ

L’obiettivo dell’analisi è stato quello di comprendere in quale modo le caratteristiche di un ascensore ne determinano il peso. Un ascensore, infatti, è progettato per soddisfare alcuni requisiti di progetto, fra i quali, per esempio, il numero di persone che deve sollevare e l'altezza che deve raggiungere.

Questo studio è utile ai fini della tesi perchè consente di prevedere quale sarà il peso di un ascensore, conoscendone solamente alcune informazioni progettuali di base.

DATASET

Il dataset utilizzato è costituito da 40 casi; ogni caso rappresenta un sistema ascensore, per il quale sono noti:

- il peso (Totalmass - W), con un range di valori tra i 450 e i 2500 kg;
- il carico nominale che l’ascensore è in grado di sollevare (Ratedload - R), con un range di valori tra i 450 e i 2500 kg;
- il numero di piani serviti (Floor - F), con un range di valori tra i 2 e i 35;
- l’altezza di viaggio massima (Travel height - T), con un range di valori tra i 4,7 e i 200 m.

Nel presente studio il peso dell'ascensore è la variabile dipendente, mentre le altre caratteristiche (R, F e T) sono le covariate, o variabili indipendenti.

Tabella 59 - Dataset

|    | Totalmass | Ratedload | Floor | Height |
|----|-----------|-----------|-------|--------|
| 1  | 7968      | 1000      | 15    | 45     |
| 2  | 2803      | 630       | 5     | 12     |
| 3  | 2872      | 630       | 5     | 12     |
| 4  | 6953      | 1600      | 5     | 12     |
| 5  | 10031     | 1000      | 21    | 65     |
| 6  | 8093      | 2500      | 3     | 6      |
| 7  | 2887      | 450       | 5     | 12     |
| 12 | 8710      | 1600      | 8     | 30     |
| 13 | 22147     | 1600      | 30    | 102    |
| 14 | 8476      | 2000      | 6     | 20     |

|    |       |      |    |     |
|----|-------|------|----|-----|
| 15 | 4961  | 1000 | 5  | 12  |
| 16 | 7980  | 1000 | 15 | 45  |
| 17 | 4714  | 1133 | 2  | 5   |
| 18 | 7395  | 1588 | 5  | 12  |
| 19 | 39632 | 1600 | 20 | 200 |
| 20 | 41765 | 1600 | 20 | 200 |
| 21 | 2734  | 500  | 5  | 13  |
| 22 | 30041 | 1600 | 35 | 150 |
| 23 | 13834 | 1588 | 9  | 29  |
| 24 | 7087  | 1588 | 6  | 20  |
| 25 | 30041 | 1600 | 35 | 150 |
| 27 | 2609  | 630  | 5  | 11  |
| 28 | 3564  | 1000 | 4  | 15  |
| 29 | 2574  | 630  | 4  | 17  |
| 30 | 2609  | 630  | 5  | 11  |
| 31 | 7030  | 1000 | 12 | 35  |
| 32 | 12564 | 1600 | 14 | 63  |
| 39 | 2557  | 675  | 5  | 12  |
| 40 | 3081  | 675  | 8  | 21  |
| 41 | 5146  | 1000 | 15 | 42  |
| 42 | 10638 | 1000 | 20 | 65  |
| 43 | 5146  | 1000 | 15 | 42  |
| 44 | 6194  | 1588 | 5  | 14  |
| 45 | 8620  | 1600 | 10 | 50  |
| 46 | 4789  | 1000 | 8  | 21  |
| 47 | 5708  | 1600 | 5  | 12  |
| 48 | 36553 | 1600 | 18 | 180 |
| 49 | 28719 | 1600 | 20 | 120 |
| 50 | 35584 | 1000 | 20 | 149 |
| 51 | 17759 | 1600 | 15 | 120 |

PROCEDURA SVOLTA

1. Analisi esplorativa dei dati

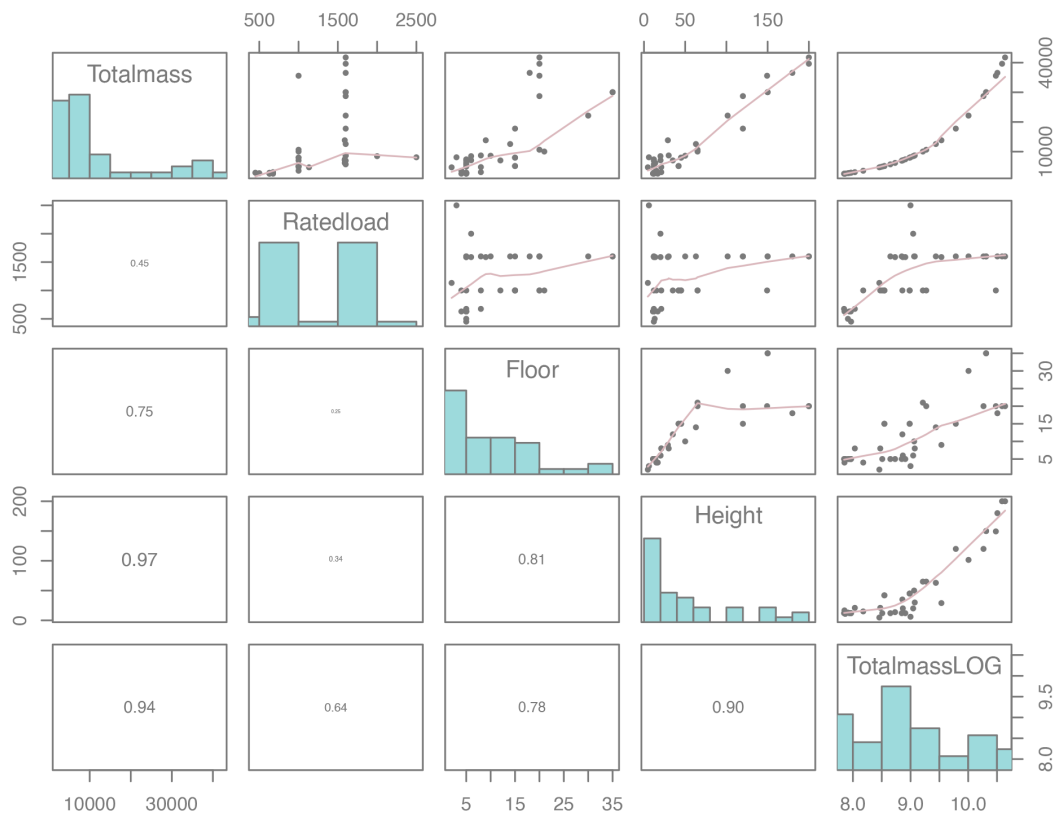
Come prima fase è stata svolta un'analisi esplorativa dei dati, con l'obiettivo di comprenderne la struttura e



identificare eventuali anomalie e relazioni tra le variabili. Questa fase è stata fondamentale per l'indirizzamento verso la costruzione di un modello statistico adatto.

Come mostrato in *Figura 9*, durante questa fase è stato creato un plot al fine di visualizzare ed analizzare la distribuzione delle variabili (R, F, e H) e la loro correlazione con il peso dell'ascensore (W). Sulla diagonale sono presenti gli istogrammi che rappresentano la distribuzione di ciascuna variabile; nella parte superiore del grafico sono visualizzati gli scatterplot, mentre nella parte inferiore sono riportati i coefficienti di correlazione tra le variabili.

Figura 9 -Analisi della distribuzione delle variabili



È stata poi condotta una verifica della qualità dei dati (al fine di individuare eventuali valori mancanti o errori di misurazione) e una valutazione delle modalità di strutturazione del modello in base alle variabili disponibili. L'analisi non ha evidenziato la necessità di eliminare dati, perciò tutti i 40 casi del dataset sono stati inclusi nel modello.

Come si può notare in *Figura 9*, si è scelto di lavorare con il logaritmo della massa totale (TotalmassLOG), in quanto il valore della massa è una quantità che deve essere strettamente positiva.

## 2. Scelta del modello lineare con una procedura STEP-WISE basata sull'indice AIC

Per la creazione del modello, è stata utilizzata la procedura Step-Wise, ossia una tecnica iterativa per la selezione delle variabili più significative da includere nel modello. Questa procedura si basa sull'AIC (Akaike Information Criterion), un indice che bilancia la qualità del modello e la sua complessità (un valore di AIC più basso indica un modello migliore). La procedura step-wise ha permesso di selezionare il miglior set di variabili, riducendo l'overfitting e migliorando la capacità di generalizzazione del modello.

È stato scelto il modello lineare che ha selezionato le seguenti variabili ed interazioni:

- Height (H)
- Floor (F)
- Ratedload (R)
- Height:Floor (HF)
- Height:Ratedload (HR)
- Floor:Ratedload (FR)

In *Tabella 60* è riportato l'output del modello. Analizzando i coefficienti e i relativi test di ipotesi si nota che la maggior parte delle variabili principali e delle loro interazioni ha un p-value inferiore a 0,05. Quasi tutte le variabili risultano quindi statisticamente significative. In particolare gli elementi che influenzano in modo significativo la variabile Peso (W) sono le variabili Height (H), Ratedload (R), e le interazioni Height:Floor (HF), Height:Ratedload (HR), e Floor:Ratedload (FR). Solo la variabile Floor (F), isolatamente, non raggiunge la soglia di significatività, contribuendo però in modo rilevante attraverso le interazioni in cui è presente.

Tabella 60 - Output del modello

| Term             | Estimate | Std_Error | z_value  | p_value  |
|------------------|----------|-----------|----------|----------|
| (Intercept)      | 7,325696 | 0,152321  | 48,09371 | 3,87E-32 |
| Height           | 0,035452 | 0,007105  | 4,990036 | 1,9E-05  |
| Floor            | -0,05133 | 0,034845  | -1,47299 | 0,15023  |
| Ratedload        | 0,000663 | 0,000124  | 5,344739 | 6,67E-06 |
| Height:Floor     | -0,00025 | 0,000108  | -2,33493 | 0,025778 |
| Height:Ratedload | -1,5E-05 | 4,25E-06  | -3,47115 | 0,001466 |
| Floor:Ratedload  | 5,88E-05 | 2,68E-05  | 2,195387 | 0,035275 |

Per verificare la bontà del modello sono stati osservati diversi indicatori statistici:

- $R^2$ : 0.9649;
- Adjusted  $R^2$ : 0.9585;
- F-statistic: 151.1 on 6 and 33 DF.
- Residual standard error: 0.1777 on 33 degrees of freedom.

Il valore di  $R^2$  (intorno ad 1) indica che circa il 96,5% della variabilità della variabile dipendente (W) è spiegata dalle variabili indipendenti (R, F, H) e dalle loro interazioni (RF, RH, FH). Il valore di  $R^2$  aggiustato (anch'esso intorno ad 1), conferma che il modello è ben bilanciato e che le variabili introdotte sono realmente informative e non introducono complessità inutile (evitando l'overfitting).

Il test F-statistic dimostra che il modello è complessivamente altamente significativo mentre l'errore standard residuo suggerisce che le previsioni del modello sono mediamente molto vicine ai valori osservati.

Complessivamente, il modello è ben strutturato, spiega gran parte della variabilità dei dati e include predittori significativi sia singolarmente sia attraverso le loro interazioni, giustificandone la bontà e l'utilità descrittiva e predittiva.

L'analisi ha dunque permesso di stimare la relazione tra il peso dell'ascensore (W), l'altezza massima di viaggio (H), il carico nominale (R) e il numero di piani che serve (F) espressa nella seguente formula:

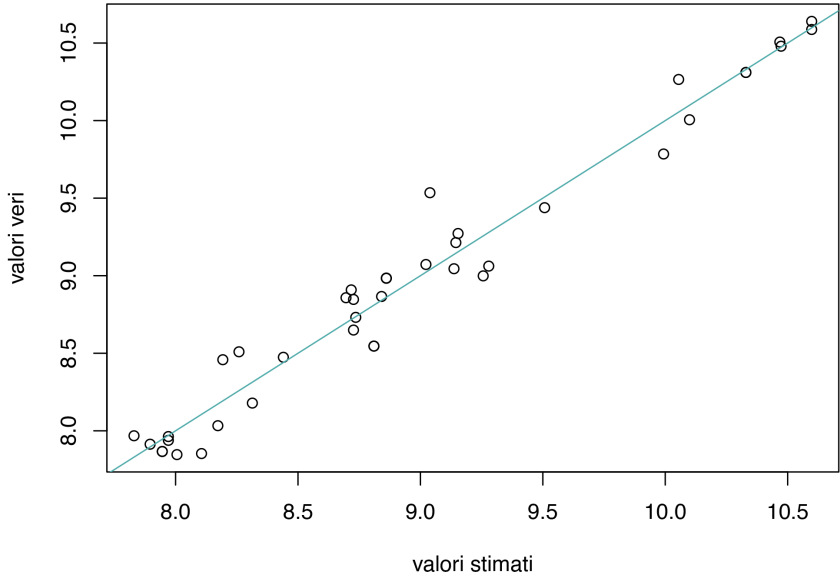
$$W \text{ [kg]} = \exp [ 7,326 + (H*3,55E-2) + (F* - 5,13E-2) + (R*6,63E-4) - (H*F*-2,53E-4) + (H*R*-1,48E-5) + (F*R*5,88E-5) ]$$

### 3. Valutazione del modello

Una volta selezionato il modello, è stata effettuata una valutazione della sua qualità e affidabilità.

Nel *Grafico 24* è mostrato il plot dei valori previsti contro i valori veri (che rappresenta a confronto i valori stimati dal modello e i valori reali); questo consente di comprendere visivamente la bontà del modello: i valori stimati non si discostano significativamente dai valori reali, allineandosi sulla diagonale (definita linea di perfetta previsione) e si può dunque concludere che il modello restituisce una buona modellizzazione dei dati.

Grafico 24 - Confronto tra i valori stimati e i valori veri



Si è poi proseguito analizzando i residui (calcolati come la differenza tra il valore vero osservato e il valore stimato dal modello). Il *Grafico 25* testimonia la bontà del modello: come si può osservare, infatti, sono presenti residui piccoli e distribuiti casualmente attorno allo 0, privi di un pattern sistematico che indicherebbe che il modello non cattura qualche relazione importante nei dati.

Il *Grafico 26* mostra infine il Q-Q Plot del modello, che è stato utilizzato per verificare la normalità della distribuzione dei residui. Come si può osservare, i punti del grafico si dispongono lungo una linea retta diagonale, a testimonianza di una distribuzione normale: scostamenti sistematici da questa linea indicherebbero che i residui non sono normalmente distribuiti, suggerendo potenziali problemi di specificazione del modello o la necessità di trasformazioni sui dati.

Grafico 25 - Plot dei residui

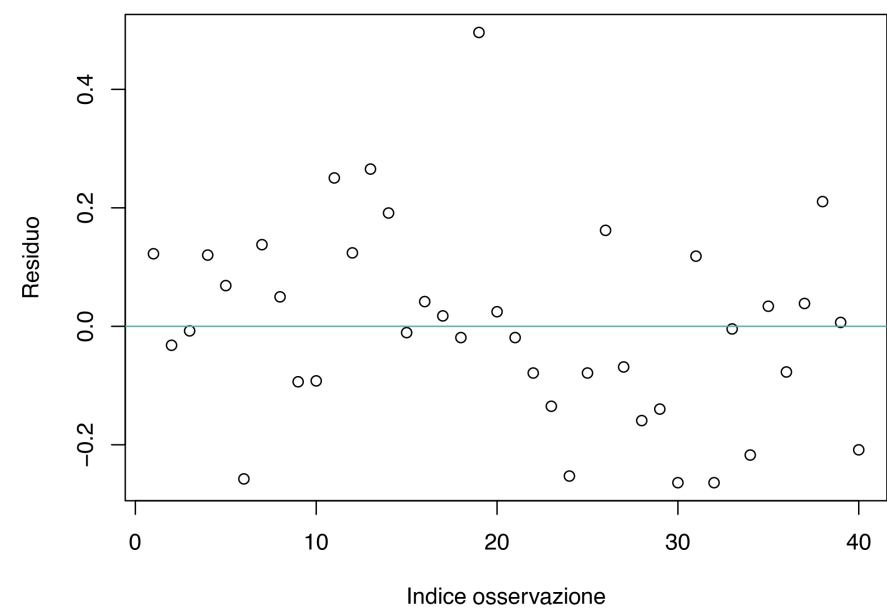
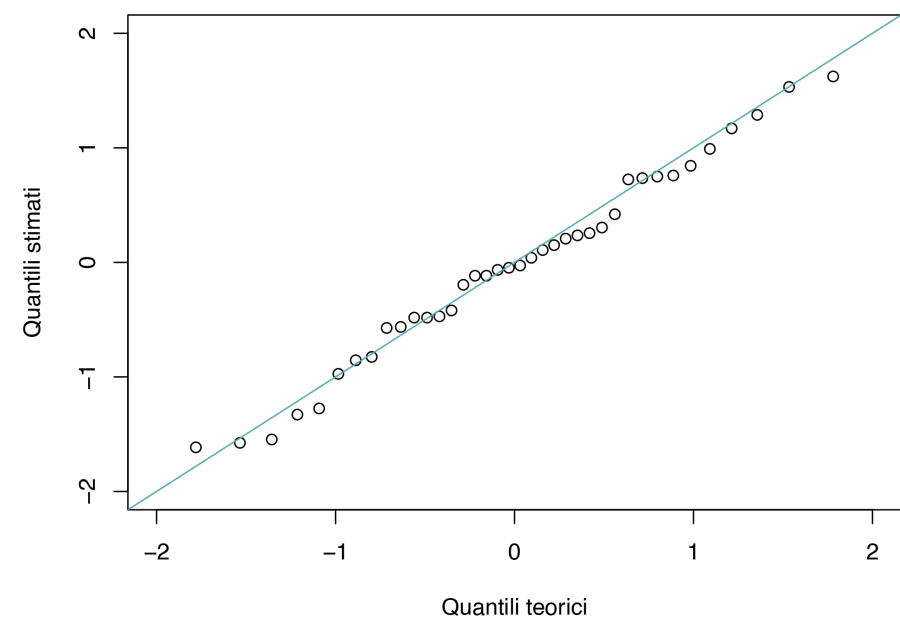


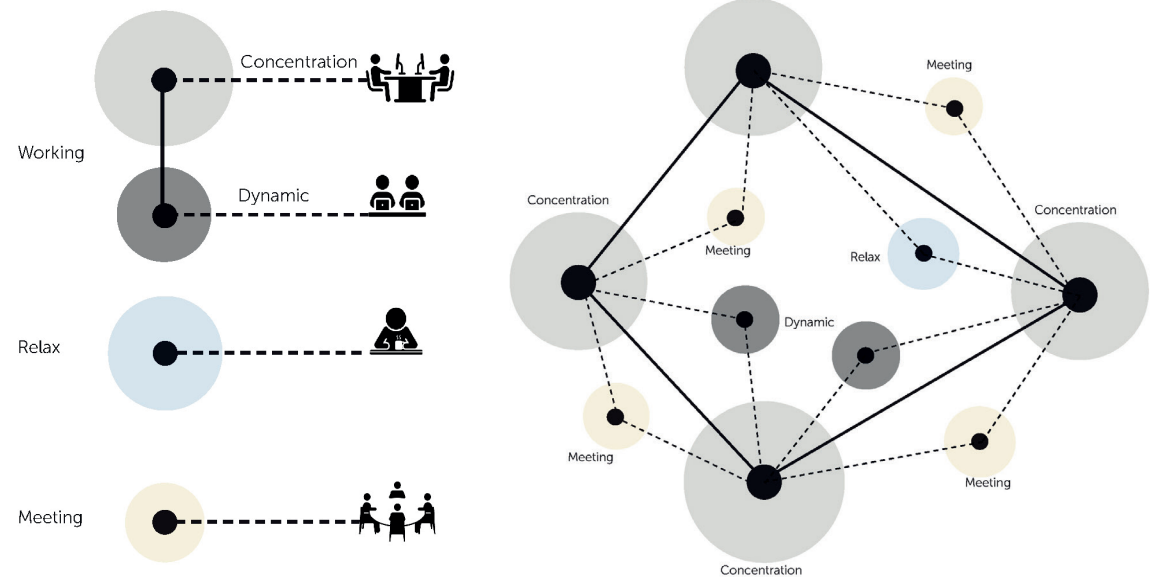
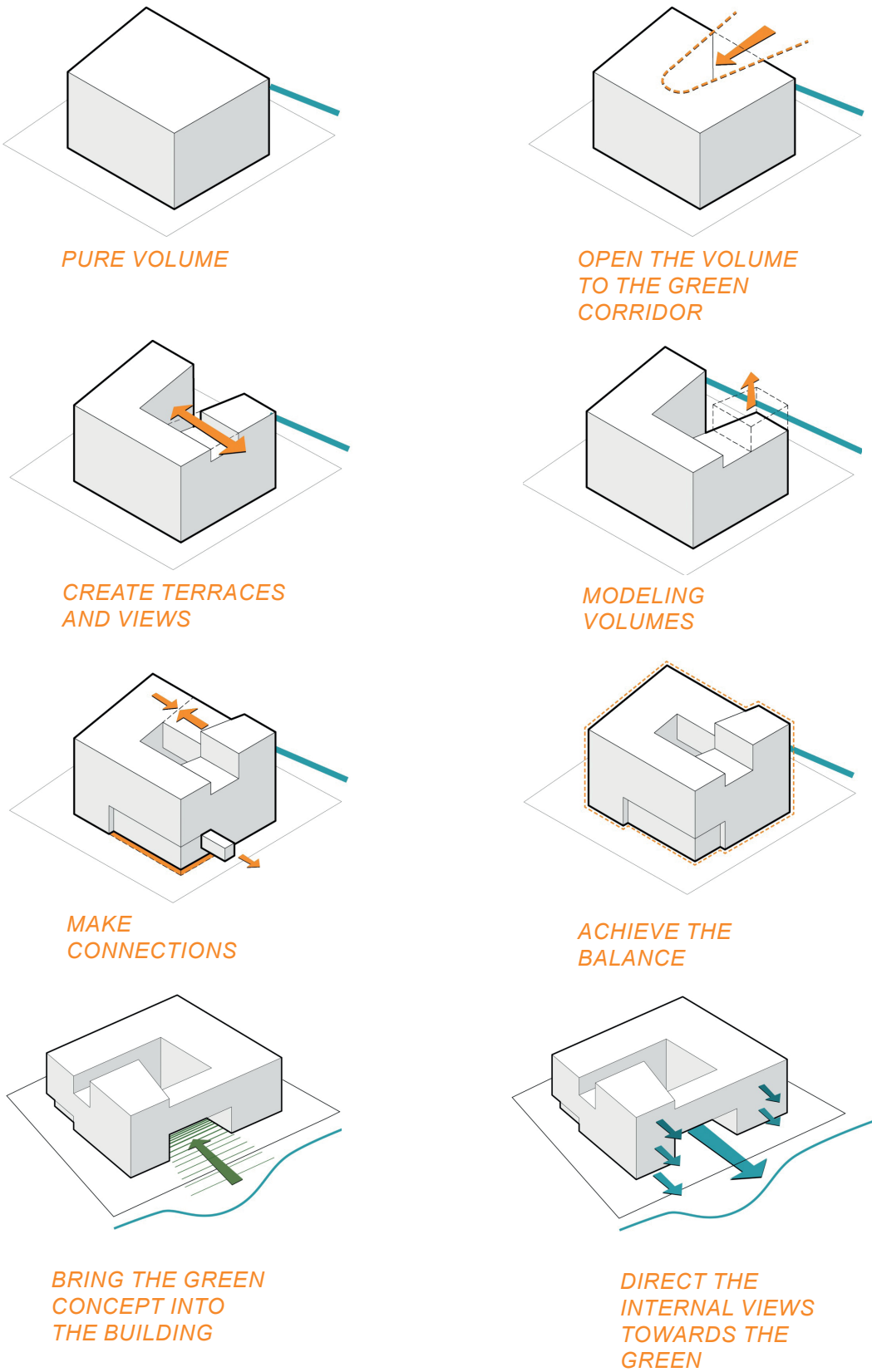
Grafico 26 - Q-Q Plot



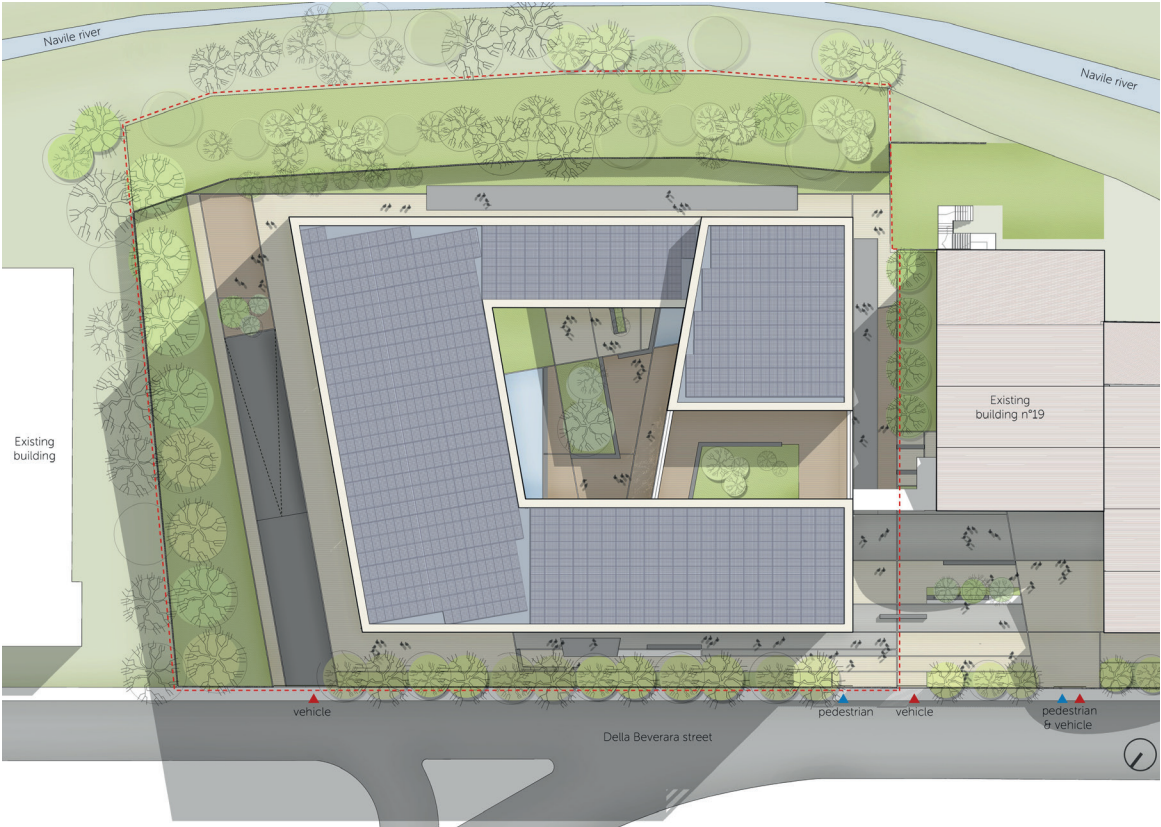
# 8. ALLEGATI

8.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO

Schemi



Planivolumetrico





Pianta piano terra



Pianta piano primo





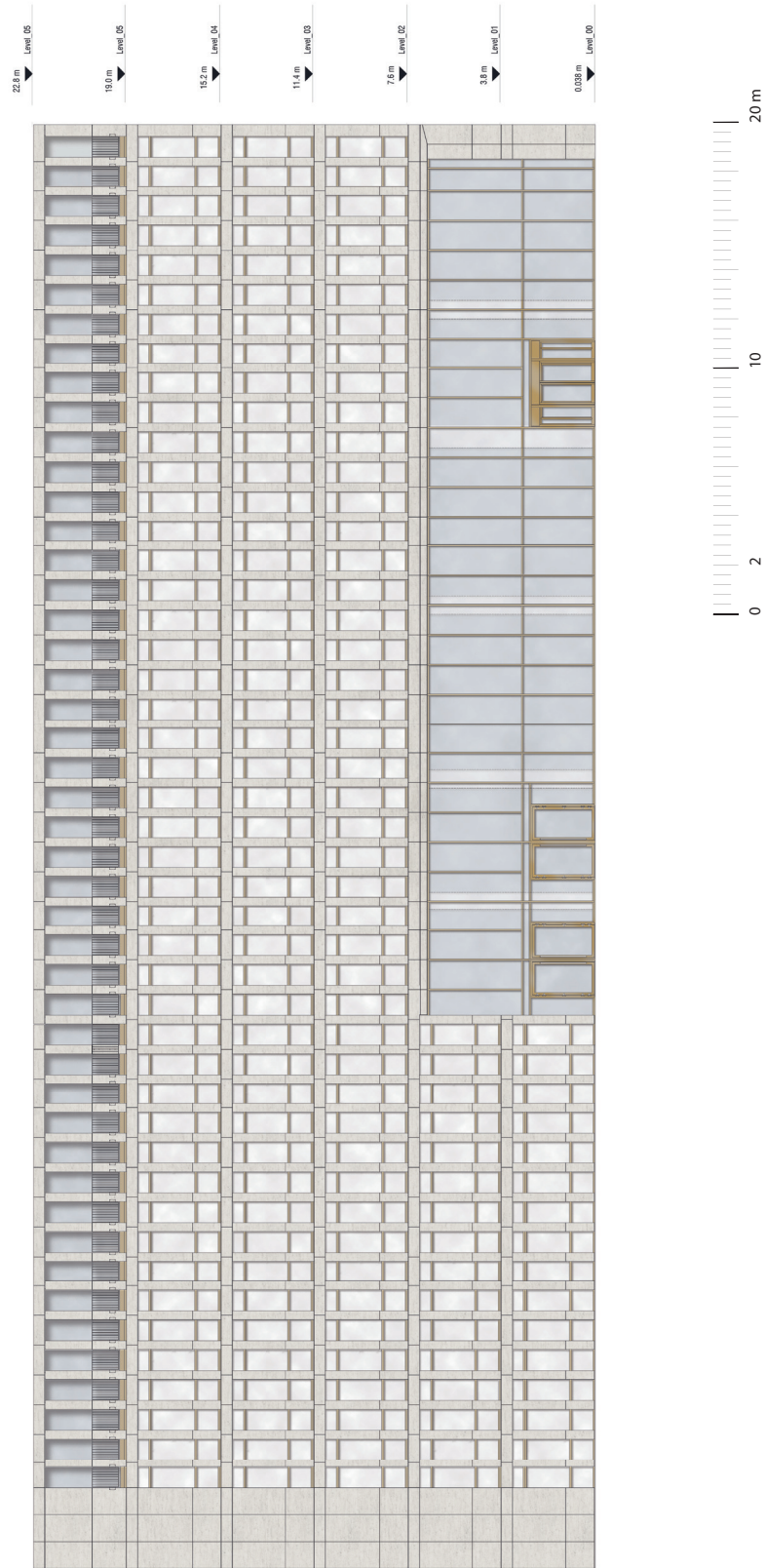
Pianta piano secondo



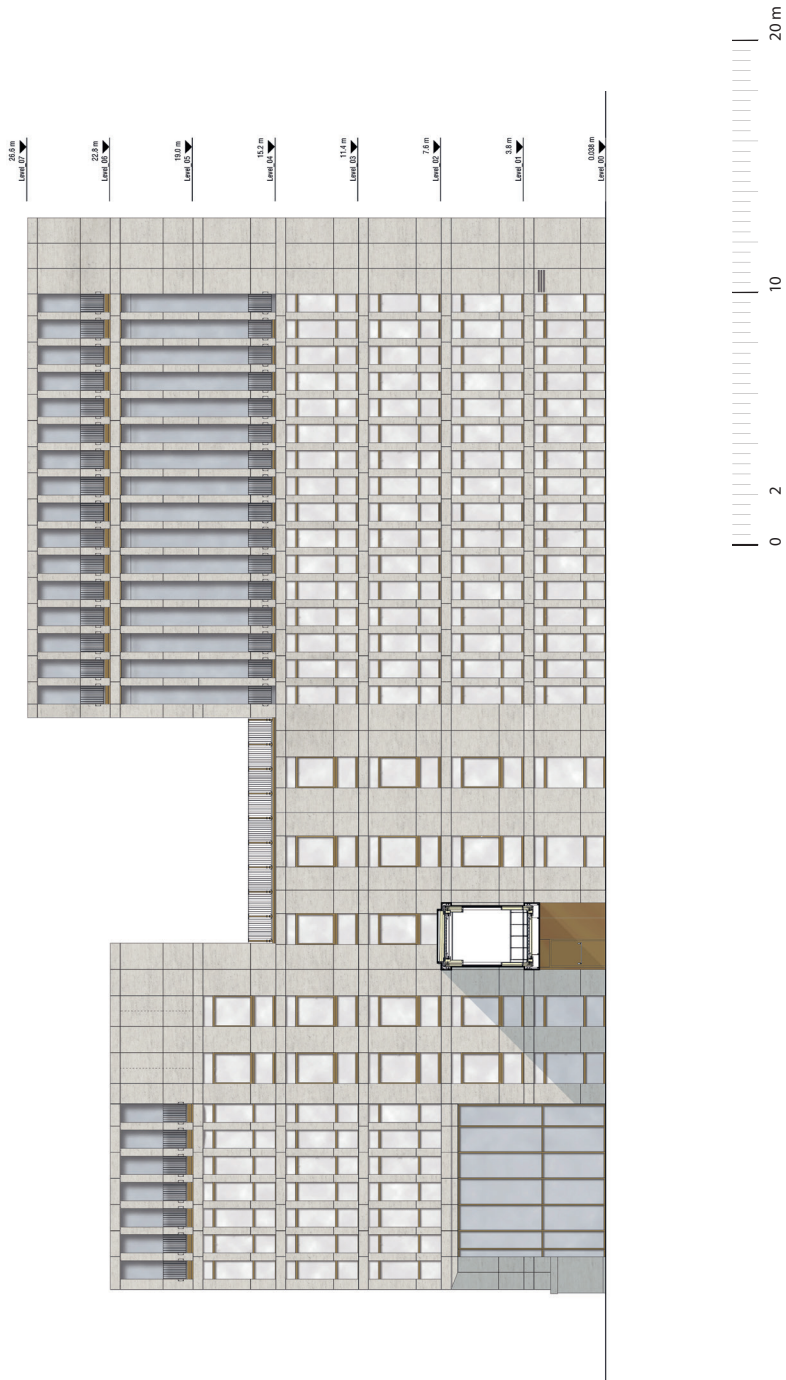
Pianta piano terzo



Prospetto nord-ovest



Prospetto sud-ovest



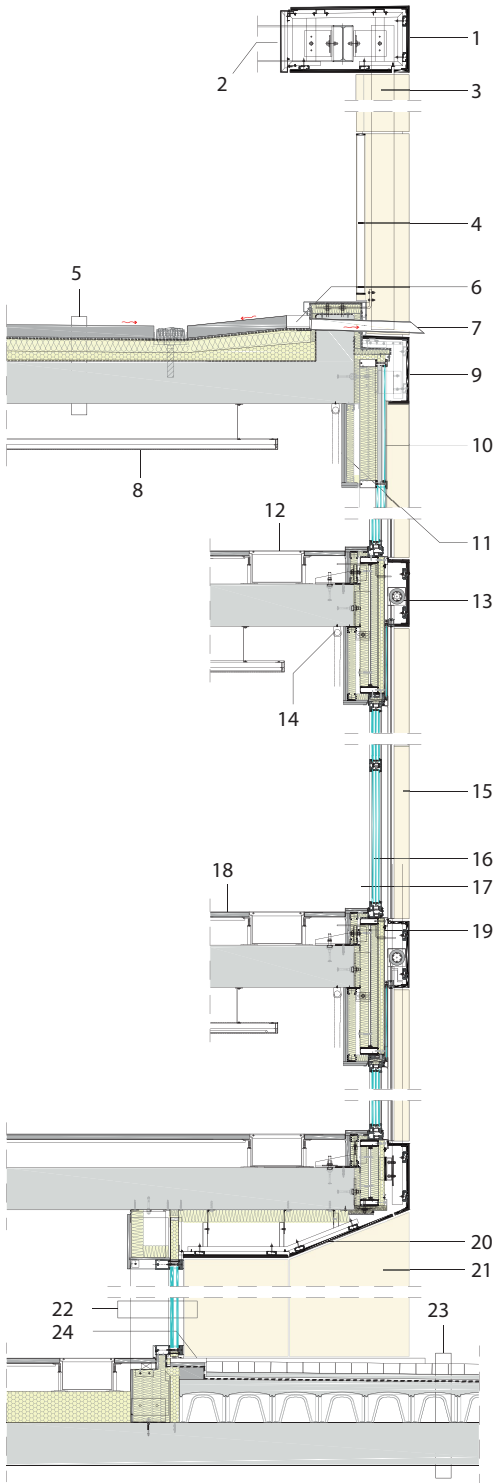


Sezione



Dettaglio A: Sistema costruttivo

- 1- Fascia marcapiano a filo facciata, struttura in acciaio IPE 240 e rivestimento in gres su supporto in profili tubolari in acciaio
- 2- Pannello composito di tamponamento
- 3- Sottostruttura in acciaio pilastrino e rivestimento esterno in gres
- 4- Parapetto realizzato con piatti in acciaio sp 8mm, passo 100mm, saldati a scatolari superiore ed inferiore, ancorati ai pilastrini strutturali
- 5- Pilastro tubolare in acciaio a sostegno del pergolato fotovoltaico
- 6- Travi IPE 330 a sostegno del pergolato fotovoltaico
- 7- Solaio di copertura su struttura metallica coibentata con soletta armata su lamiera grata sp 120mm, barriera al vapore, isolamento termico in EPS + PIR pendenzato sp min 15 cm, guaina impermeabilizzante, massetto di ripartizione dei carichi con rete elettrosaldata sp 8 cm con finitura elicoterata
- 8- Rivestimento esterno in gres su supporto in profilato ancorato alla struttura metallica
- 9- Faretto incassato
- 10- Controsoffitto corridoio interno in pannelli metallici ispezionabili; veletta tecnica prefabbricata per passaggio impianti e fascia di compensazione laterale in cartongesso
- 11- Facciata continua in triplo vetro a telai indipendenti con specchiature fisse ed aperture ad anta ed anta-ribalta
- 12- Specchiatura apribile
- 13- Specchiatura fissa
- 14- Rivestimento in cartongesso
- 15- Terrazza con massetto in calcestruzzo pendenzato e finitura in gres porcellanato da esterno grande formato
- 16- Pluviale
- 17- Pavimento galleggiante finito con tessuto vinilico effetto stuoia
- 18- Struttura metallica di collegamento coibentato con soletta armata su lamiera grata sp 120mm, pavimento galleggiante finito con tessuto vinilico effetto stuoia
- 19- Facciata continua a telai indipendenti con specchiature fisse ed aperture ad anta-ribalta, integrata ad elementi orizzontali di rivestimento.
- 20- Setto parafiamma coibentato composto da doppia lastra in silicato e solfato di calcio con sigillatura antifumo
- 21- Vetropannello composto da: lastra esterna sp. 6mm in vetro temperato HST smaltato esternamente; coibentazione in lana minerale pressata sp. 25mm; lastra in cartongesso acustico sp. 15mm; lamiera di contenimento interno non visibile in acciaio zincato sp. 2mm
- 22- Marcapiano in gres porcellanato con soluzione ad angolo monolitico e ancoraggio per mezzo di profili ad incastro orizzontali e verticali collocati sul retro delle lastre stesse



Dettaglio B: Sistema costruttivo

- 1- Fascia marcapiano a filo facciata, struttura in acciaio IPE 240 e rivestimento in gres su supporto in profili tubolari in acciaio

2- Pannello composito di tamponamento

3- Sottostruttura in acciaio pilastro e rivestimento esterno in gres

4- Parapetto realizzato con piatti in acciaio sp 8mm, passp 100mm, saldati a scolarari superiore ed inferiore, ancorati ai pilastri strutturali

5- Solaio strutturale di copertura sp 28 cm, coperto da barriera al vapore, isolamento termico in EPS pendenzato + isolamento termico in Stiferite sp 8 cm, doppia guaina impermeabilizzante posata a caldo, strato separatore in doppio foglio di polietilene, massetto di ripartizione dei carichi sp 8 cm con rete elettrosaldata 16x16 cm diametro 6 mm

6- Pozzetto realizzato in opera posato su piastrella in gres a protezione guaina

7- Doccione di scarico con funzione di "troppo pieno" di sicurezza collegato ad elemento di tenuta

8- Controsoffitto in pannelli radianti (canopy) ancorati tramite pendinatura

9- Marcapiano in gres porcellanato con soluzione ad angolo monolitico e ancoraggio per mezzo di profili ad incastro orizzontali e verticali collocati sul retro delle lastre stesse

10- Vetropannello composto da: lastra esterna sp. 6mm in vetro temperato HST smaltato esternamente; coibentazione in lana minerale pressata sp. 25mm; lastra in cartongesso acustico sp. 15mm; lamiera di contenimento interno non visibile in acciaio zincato sp. 2mm
- 11- Setto parafiamma coibentato di chiusura dell'intercapedine del solaio composto da doppia lastra in silicato e solfato di calcio con sigillatura antifluo

12- Fancoil a pavimento

13- Tendaggio esterno motorizzato a scomparsa, dotato di guide laterali incassate sulle lesene laterali

14- Tenda a rullo interna con azionamento manuale

15- Lesena laterale rivestita esternamente in gres porcellanato con soluzione ad angolo monolitico

16- Facciata continua in triplo vetro stratificato a telai indipendenti con specchiature fisse ed aperture ad anta-ribalta, integrata ad elementi verticali ed orizzontali di rivestimento esterno

17- Imbotte laterale in alluminio in corrispondenza dei pilastri in calcestruzzo armato

18- Pavimento galleggiante finito con tessuto vinilico effetto stuoia

19- Scossalina interna in alluminio

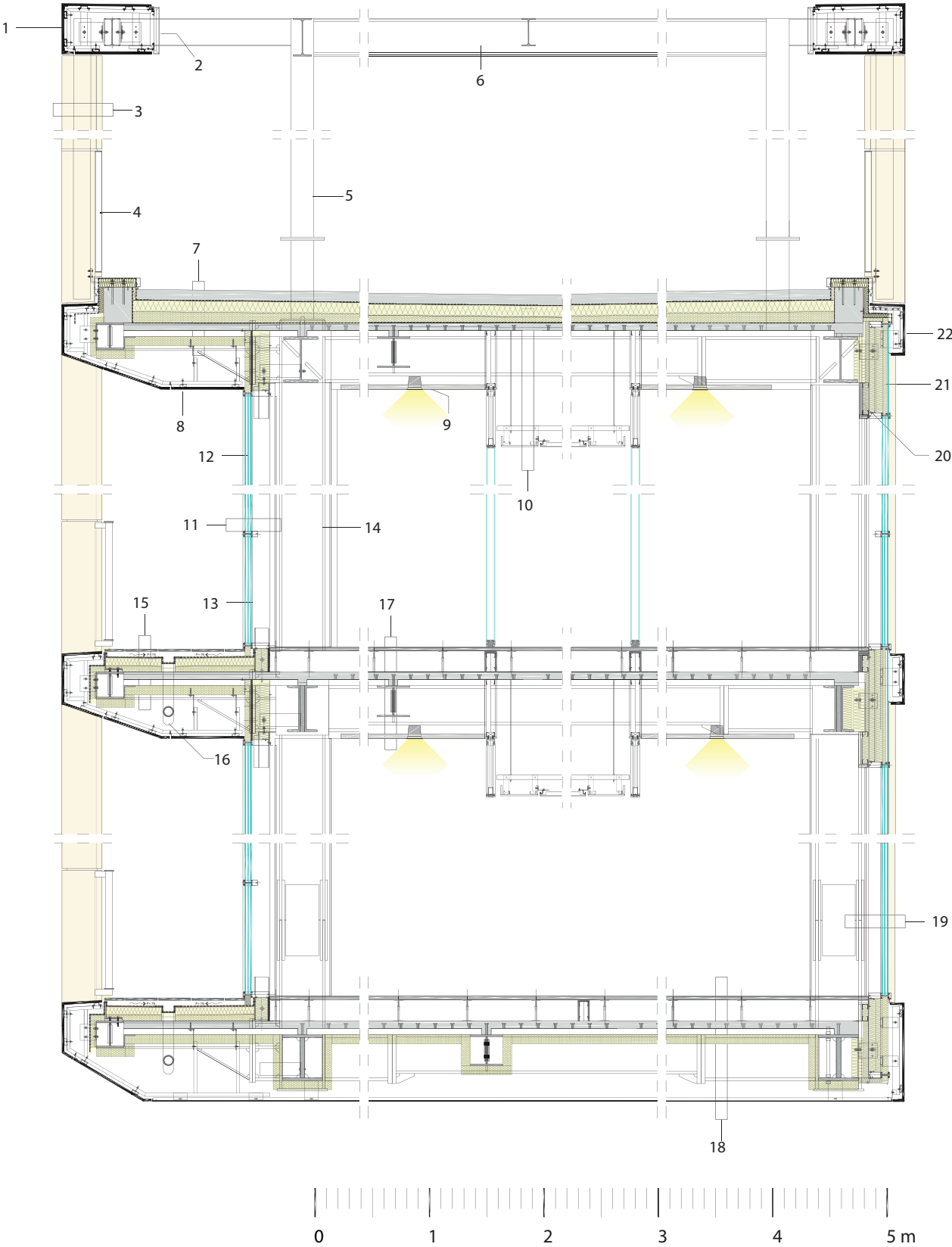
20- Rivestimento esterno in gres ancorato su struttura pendinata

21- Rivestimento in esterno in gres

22- Facciata continua a montanti e traversi con specchiature fisse

23- Solaio strutturale a copertura del piano interrato, vespaio aerato con getto in calcestruzzo armato pendenzato, doppia guaina impermeabilizzante composto da tessuto non tessuto antiradice e guaina impermeabile in manto sintetico pvc, soletta in calcestruzzo, masselli autobloccanti in calcestruzzo vibrocompresso fuggati con sabbia polimerico non drenante posati su colla

24- Sogliai in pietra naturale simile al gres di facciata



### 8.2 MODELLI DI CALCOLO

Tramite il seguente QR code si da accesso al file editabile con i modelli per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq dei Pannelli Fotovoltaici al Silicio (PV Mono-SI, PV Poli-Si), dei Pannelli Fotovoltaici al Tellururo di Cadmio (PV CdTe), dei Collettori Solari Termici (CST) e degli Ascensori.



### 9. BIBLIOGRAFIA



## Normativa

CEN. (2011). EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

European Parliament and Council of the European Union. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*. Official Journal of the European Union.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>

European Union. (2021). *Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e modifica i regolamenti (CE) n. 401/2009 e (UE) 2018/1999 ("Legge europea sul clima")*.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>

Unione Europea. (2024). *Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32024L1275>

Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (1981). *UNI 8290-1:1981 + A122:1983 – Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia*.

[https://store.uni.com/p/UNI829001-83/uni-8290-11981-a1221983-781/UNI829001-83\\_EIT](https://store.uni.com/p/UNI829001-83/uni-8290-11981-a1221983-781/UNI829001-83_EIT)

UNI. (2011). *UNI EN 15978:2011 – Sostenibilità delle opere di costruzione – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici – Metodo di calcolo*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO.

## Standard/Linee guida tecniche

Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). (2021). *TM65 Embodied carbon in building services: a calculation methodology*. CIBSE.

<https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/embodied-carbon-in-building-services-a-calculation-methodology-tm65>

EPD Italy. (n.d.). *Moduli fotovoltaici (PV) in silicio mono-cristallino*. EPD Italy.

<https://www.epditaly.it/epd/moduli-fotovoltaici-pv-in-silicio-mono-cristallino/>

EPD Italy. (n.d.). *PCR per i pannelli solari (EPDItaly 014)*. EPD Italy.

[https://www.epditaly.it/pcr\\_/pcr-per-i-pannelli-solari-epditaly-014/](https://www.epditaly.it/pcr_/pcr-per-i-pannelli-solari-epditaly-014/)

South Coast Air Quality Management District. (2024). *Off-road mobile source emission factors (scenario years 2007–2025)*. South Coast AQMD.

<https://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/ceqa/air-quality-analysis-handbook/off-road-mobile-source-emission-factors>

## Report

Andreotti, J., & Giordano, R. (2024). *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio*. Green Building Council Italia.

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

Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2022). *How to embed Whole Life Carbon in the EPBD: A summary of policy recommendations and technical guidance*.

<https://www.bpie.eu/publication/how-to-embed-whole-life-carbon-in-the-epbd/>

Commissione Europea. (2021). *Fit for 55: raggiungere l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 sulla strada verso la neutralità climatica*. Commissione Europea.

[https://ec.europa.eu/info/publications/210714-climate-communication\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/210714-climate-communication_en)

Publications Office of the European Union. (2023). *Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of*

*buildings: Final report.*

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/923706b7-8f41-11ee-8aa6-01aa75ed71a1/language-en>

ECCO. (2023). *Elementi minimi per una legge sul clima: Technical report.*

[https://eccoclimate.org/wp-content/uploads/2023/01/Technical-report\\_elementi-minimi-legge-clima-IT.pdf](https://eccoclimate.org/wp-content/uploads/2023/01/Technical-report_elementi-minimi-legge-clima-IT.pdf)

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency by 2030.* IRENA.

European Commission. (2019). *The European Green Deal.* European Commission.

[https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0006.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF)

Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., & Stucki, M. (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems.* International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS).

<https://iea-pvps.org/key-topics/technical-reports/>

LETI, RIBA, GLA, IStructE, & UKGBC. (2021). *Embodied Carbon Targets and Ratings for UK Buildings.* LETI.

<https://www.leti.uk>

Royal Institute of British Architects (RIBA). (2021). *RIBA 2030 Climate Challenge.*

<https://www.architecture.com/about/policy/climate-action/2030-climate-challenge>

Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (n.d.). *Guida per il cliente sulle valutazioni del carbonio nell'intero ciclo di vita.*

<https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/standards/WLCA-client-guide.pdf>

Legambiente. (2022). *Il settore edilizio verso una nuova sfida: la decarbonizzazione delle costruzioni: Report 2022.*

[https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2022/11/La-decarbonizzazione-delle-costruzioni\\_report-2022.pdf](https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2022/11/La-decarbonizzazione-delle-costruzioni_report-2022.pdf)

International Renewable Energy Agency, C. P. (2024). *Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy*

capacity and doubling energy efficiency by 2030.

Steinmann, J., Röck, M., Lützkendorf, T., Allacker, K., & Le Den, X. (2022). *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings: Review of existing national legislative measures.* Ramboll & KU Leuven.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7330155>

Smith Innovation. (2024). *INDICATE LIFE: Accelerating Whole Life Carbon data in the EU building sector.*

<https://www.indicatedata.com/>

World Green Building Council. (2022). *EU Policy Whole Life Carbon Roadmap: A pathway to fully decarbonise the built environment by 2050.*

<https://worldgbc.org/article/eu-policy-whole-life-carbon-roadmap/>

## Articoli

Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). *Photovoltaics: Life-cycle analyses.* Solar Energy, 85(8), 1609-1628.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>

Lupu, A.-G., Sallah, M., Belecciu, C., & Popescu, A. (2022). *Life Cycle Analyses for Solar Thermal Collectors. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași.* Machine Constructions Section, 68(1), 89-98.

<https://doi.org/10.2478/bipcm-2022-0007>

Santos, J., & Rodrigues, E. (2018). *The embodied CO<sub>2</sub>e of sustainable energy technologies used in buildings: A review article.* Energy and Buildings, 175, 96-111.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.014>

Ramachandran, A. (2024, August 9). *Reducing MEP embodied carbon: Why it matters and what can be done.* OneClick LCA.

<https://oneclicklca.com/en/resources/articles/reducing-mep-embodied-carbon>

Università degli Studi di Trento. (2023, April 20). *La transizione green dell'edilizia.* UniTrentoMag.

<https://webmagazine.unitn.it/orientamento/116424/la-transizione-green-dell-edilizia>

## Sitografia

Green Building Council Italia. (s.d.). *INDICATE LIFE*. Tratto da Green Building Council Italia.

<https://gbcitalia.org/indicate-life/>

To be. (s.d.). Life Cycle Assessment. Tratto da To be.

<https://to-be.it/soluzioni/life-cycle-assessment/#a-cosa-serve-la-lca>

Expoclima. (n.d.). *Gli elementi costitutivi di un impianto solare termico*. Expoclima.

<https://www.expoclima.net/gli-elementi-costitutivi-di-un-impianto-solare-termico>

European Union. (s.d.). Energy Efficiency First principle. Tratto da European Commission:

[https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle_en)

Mpartner. (n.d.). *HQ CRIF – Bologna*. Tratto da Mpartner:

<https://www.mpartner.it/projects/gioia-22-milano-2-3-2-3/>

Mezzi, P. (s.d.). Bologna, Politecnica firma i nuovi uffici di Crif. Tratto da INFObuildingegneria:

<https://www.infobuildenergia.it/progetti/politecnica-uffici-crif-sostenibilita/>

Il portale per l'architettura sostenibile, il risparmio energetico, le fonti rinnovabili in edilizia.

<https://www.infobuildenergia.it/progetti/politecnica-uffici-crif-sostenibilita/>

modulo.net. (2025, 01 06). *politecnica-ingegneria-e-architettura*.

Tratto da modulo.net. <https://modulo.net/it/progettisti/politecnica-ingegneria-e-architettura>

Manferdini, S. (2024, 22 gennaio). *Un progetto di visione e rigenerazione. Il nuovo distretto commerciale CRIF21 di Politecnica*.

Tratto da *DESIGN COURIER*. La rivista dei (e sui) pensatori critici nel campo dell'architettura e del design.

<https://www.thedesigncourier.com/canvas-of-plans-and-drawings/a-project-of-vision-and-regeneration-the-novel-crif21-business-district-by-politecnica>

LETI. (s.d.). *Carbon Alignment*. LETI.

Recuperato da <https://www.leti.uk/carbonalignment>

Politecnica. (2025, 01 06). Centro Direzionale CRIF21, Una trasformazione eco-friendly che anima il tessuto urbano.

Tratto da POLITECNICA, building for humens. <https://www.politecnica.it/portfolio/centro-direzionale-crif21/>

Al termine del lavoro di tesi, ritengo doveroso dedicare qualche riga ad alcuni ringraziamenti.

Voglio ringraziare in primis il mio relatore, il professore **Roberto Giordano**, per avermi ascoltata, indirizzata e seguita lungo questo percorso, durato un po' più del previsto.

Grazie alle mie correlatrici **Federica** e **Benedetta**, per i consigli, l'incoraggiamento e il tempo che mi hanno dedicato.

Grazie soprattutto a **Jacopo**, che c'è sempre stato, e ha sempre prontamente risposto alle mie richiesta di aiuto, che fossero le 7:00 di lunedì mattina o le 19:00 di venerdì sera (spero di non aver abusato della sua pazienza e di averlo perlomeno divertito un po' con alcune delle mie "formulazioni creative").

In generale, grazie al gruppo di ricerca, per avermi mostrato, seppur in piccolo, cosa vuole dire lavorare in ambiente rispettoso e stimolante.

Ringrazio la società **Politecnica**, e in particolare **Ferdinando Sarno**, che ha condiviso con me non solo il proprio lavoro ma anche la propria visione dell'architettura. Grazie a **Verdiana**, con la quale ho avuto la fortuna di potermi confrontare e che è stata sempre estremamente disponibile.

## Grazie

Ai miei **amici**, quelli che già c'erano e quelli che si sono aggiunti durante il percorso.

A tutti gli **zii** (naturali e acquisiti) che mi hanno sostenuta, al di là di qualsiasi risultato.

Ai miei **genitori**, perchè fin da piccola mi hanno trasmesso l'amore per lo studio, senza opprimermi mai con le loro aspettative.

A **papà**, che ha gioito per ogni esame conseguito (e che si è dovuto ricredere sulla facoltà di architettura).

A **mamma**, per tutte le volte in cui mi ha calmata, ricordandomi che si trattava solo di esami, e che al massimo, la cosa peggiore che sarebbe potuta capitare, sarebbe stata non superarli.

A **Martina**, il mio esempio e la mia guida.

A **Lorenzo**, il mio porto sicuro.

A **nonno Piero**, che mi ha accolto dopo ogni esame, revisione o giornata pesante, offrendomi ogni tipo di bibita e dolce avesse in casa.

A **nonna Maria**, che non ha potuto studiare, ma che ha combattuto perchè potessero farlo i suoi nipoti. Per tutte le candele che ha acceso prima degli esami e per tutte le volte che si è commossa per un mio voto, questa laurea, è anche un po' sua.

