



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento di Architettura e Design - DAD

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità

Valutazione WLC per la transizione ecologica degli edifici

Applicazione all'edificio Pattern HQ a Collegno,
strategie di decarbonizzazione e compensazione

Relatore:

Professore Roberto Giordano

Candidate:

Anna Brizzolari s312537
Alessia Vasa s308584

Corelatori:

Jacopo Andreotti
Federica Gallina
Benedetta Quaglio

Anno accademico 2024/2025

“Ogni volta che accettiamo di fare cambiamenti responsabili, apriamo la strada a opportunità che non avremmo mai immaginato.”

Al Gore

Sommario

<i>Glossario</i>	X
<i>Introduzione</i>	XXI
<i>Organizzazione della ricerca</i>	XXII

01	Quadro teorico e metodologico delle strategie per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni	
	1. Obiettivo zero emissioni per il settore delle costruzioni	2
	1.1. Principali linee guida internazionali, europee e italiane	5
	1.1.1. Prospettive globali e approcci nazionali	6
	1.1.2. Paesi europei: normative a confronto	10
	1.1.3. Approcci e iniziative in Italia	17
	2. WLC vision di un manufatto edilizio destinato ad uffici e produttivo	23
	2.1. Whole Life Carbon assessment	25
	2.2. Circular Economy dei rifiuti da costruzione e demolizione	25
	2.3. Scenario di decarbonizzazione	28
	2.4. Embodied Carbon (EC)	29
	2.5. Operational Carbon (OC)	30
02	Analisi WLC su caso di studio Pattern HQ	
	3. Pattern Headquarter HQ	36
	3.1. Principali attori coinvolti	36
	3.1.1. Committente: PATTERN S.p.A.	36
	3.1.2. Gruppo di progettazione: SMAPROGETTI	37
	3.1.3. Gruppo di progettazione: EQ Ingegneria	37
	3.1.4. Appaltatore: Tekinda s.r.l.	38
	3.1.5. Consulenza: GET Consulting	38
	3.2. Presentazione progetto	38
	3.3. Requisiti LEED Gold e ruoli degli attori	41
	3.4. Progetto architettonico	58
	3.5. Progetto impiantistico	60
	3.5.1. Impianto di climatizzazione	60
	3.5.2. Sistema elettrico e illuminazione	61
	3.5.3. Domotica e gestione impiantistica	61

	4. Contabilizzazione EC e OC del caso studio	62
	4.1. Confini del sistema	62
	4.1.1. EC nella fase di Precostruzione	63
	4.1.2. EC nella fase di Produzione	64
	4.1.3. EC nella fase di Costruzione	66
	4.1.4. EC nella fase di Uso: modulo di Sostituzione	70
	4.1.5. EC di Impianti e Servizi	72
	4.1.6. OC nella fase di Uso: moduli di operational energy e operational water	72
	4.1.7. EC nella fase di fine vita	77
	4.2. Risultati Whole Life Carbon e Circular Economy	82
03	Strategie di intervento	
	5. Soluzioni di compensazione e decarbonizzazione applicabili al caso di studio	90
	5.1. Soluzione di decarbonizzazione per i moduli A1-A3 e B4	90
	5.2. Soluzioni di decarbonizzazione per il modulo B6	94
	5.3. Soluzioni di decarbonizzazione per il fine vita	97
	5.4. Soluzioni di compensazione	100
04	Conclusioni	106
05	Allegati	110
06	Bibliografia e sitografia	120
07	Ringraziamenti	127

Indice delle figure

Figura 1:	Tratta da ANIT, Articolo di Neo Eubios 51 https://www.anit.it/publicazione/neo-eubios-51/	XI
Figura 2:	Percentuali di incidenza delle missioni di CO ₂ eq per ciascun settore tratta da United Nations Environment Programme, 2024 p. 10	3
Figura 3:	Rielaborazione organizzazione framework COP21	4
Figura 4:	Differenziazione per tipologia e stato di applicazione dei codici energetici per gli edifici. Rielaborazione immagine IEA 2023a contenuta all'interno di United Nations Environment Programme, 2024 p.34.	7
Figura 5:	Stato di integrazione delle emissioni di gas serra del ciclo di vita nelle normative di vari paesi europei. Rielaborazione su immagine tratta da Graaf & Broer, 2023 p.7	9
Figura 6:	Scheda di approfondimento Gran Bretagna. Elaborazione personale	14
Figura 7:	Scheda di approfondimento Francia. Elaborazione personale	15
Figura 8:	Scheda approfondimento Germania. Elaborazione personale	16
Figura 9:	Linea del tempo obiettivi Roadmap italiana per la decarbonizzazione. Elaborazione personale.	22
Figura 10:	Schematizzazione del sistema di valutazione di un manufatto edilizio (a cura di Andreotti, J., Giordano, R., 2024. Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC); elaborazione personale)	24
Figura 11:	Trattamento della frazione minerale dei rifiuti da costruzione e demolizione nel 2014 (Eurostat, 2017). Da Styles, Schoenberger, Zeschmar-Lahl, Gálvez-, & Gálvez-Martos, 2018 p.168	26
Figura 12:	Livelli di valutazione delle risorse per il settore delle costruzioni. Rielaborazione da Tirado, Aublet, & Laurence, 2022 p.115	27
Figura 13:	Azioni per decarbonizzare il settore delle costruzioni. Rielaborazione da ANCE, p.40	28
Figura 14:	Percentuale di EC in base ai componenti dell'edificio. Rielaborazione personale da LETI, Climate Emergency Design	

	<i>Guide., 2020</i>	30	<i>Figura 31: Mappatura dei luoghi di conferimento dei rifiuti</i>	78
<i>Figura 15:</i>	<i>Illustrazione della strategia “top-down” e “bottom-up”. Rielaborazione personale da LETI, Climate Emergency Design Guide, 2020</i>	32	<i>Figura 32: Emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario fisso e incidenza sul totale</i>	82
<i>Figura 16:</i>	<i>Inquadramento territoriale del caso studio (elaborazione personale)</i>	39	<i>Figura 33: Totale emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario fisso</i>	83
<i>Figura 17:</i>	<i>Render di progetto tratto da (Fagone La Zita, 2024)</i>	40	<i>Figura 34: Classificazione delle emissioni di Pattern HQ in base all’EC, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon</i>	85
<i>Figura 18:</i>	<i>Render di progetto tratto da (Fagone La Zita, 2024)</i>	40	<i>Figura 35: Emissioni di EC e OC in 50 anni secondo lo stato attuale del progetto</i>	86
<i>Figura 19:</i>	<i>Pianta piano terra (a cura di SMA Progetti)</i>	48	<i>Figura 36: Dettaglio fondazioni in scala 1:50 (figura sopra). Si evidenzia la presenza del calcestruzzo gettato in opera per plinti di fondazione e pavimento industriale elicotterato.</i>	91
<i>Figura 20:</i>	<i>Pianta piano primo (a cura di SMA Progetti)</i>	50	<i>Figura 37: Dettaglio copertura scala in 1:50 (figura a lato). Si evidenzia la presenza di calcestruzzo nella struttura prefabbricata e nel getto di completamento.</i>	91
<i>Figura 21:</i>	<i>Pianta piano secondo (a cura di SMA Progetti)</i>	52	<i>Figura 38: Sezione dell’edificio in cui è evidenziata una porzione vetrata (figura sopra)</i>	92
<i>Figura 22:</i>	<i>Sezione A-A, figura sopra (a cura di SMA Progetti)</i>	54	<i>Figura 39: Dettaglio sezione verticale del serramento in scala 1:1 (figura a lato)</i>	92
<i>Figura 23:</i>	<i>Sezione B-B, figura a lato (a cura di SMA Progetti)</i>	54	<i>Figura 40: Classificazione delle emissioni dell’EC del progetto Pattern HQ attuale, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon</i>	93
<i>Figura 24:</i>	<i>Keyplan delle sezioni (a cura di SMA Progetti)</i>	55	<i>Figura 41: Classificazione delle emissioni dell’EC a fronte delle strategie proposte, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon</i>	93
<i>Figura 25:</i>	<i>Planivolumetrico (a cura di SMA Progetti)</i>	56	<i>Figura 42: Totale emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario variabile</i>	94
<i>Figura 26:</i>	<i>Rielaborazione personale della tabella riassuntiva delle emissioni di OneClickLCA</i>	65	<i>Figura 43: Emissioni Di EC e OC in 50 anni con l’applicazione delle strategie di decarbonizzazione proposte</i>	98
<i>Figura 27:</i>	<i>Scenario di configurazione impianto fotovoltaico per l’applicazione della metodologia di calcolo. Rielaborazione riferita al caso di studio tratta da Andreotti J., Giordano R., Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024. Rielaborazione personale</i>	73	<i>Figura 44: Localizzaione dei progetti che generano crediti di carbonio, rielaborazione grafica personale tratta da South Pole, The voluntary carbon market 2022-2023</i>	102
<i>Figura 28:</i>	<i>Scenario di decarbonizzazione della produzione di energia elettrica in Europa, tratto da Pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Andreotti J.,Giordano R., p. 99</i>	74		
<i>Figura 29:</i>	<i>Schema approvvigionamento energia elettrica in relazione al fabbisogno energetico dell’edificio.</i>	74		
<i>Figura 30:</i>	<i>Schema approvvigionamento energia elettrica in relazione al fabbisogno energetico dell’edificio.</i>	76		

Figura 45: *Tipologia dei progetti che generano crediti di carbonio rielaborazione grafica personale tratta da South Pole, The voluntary carbon market 2022-2023* 103

Indice delle tabelle

Tabella 1:	<i>Tratta da D.M. 26 giugno 2015 'Requisiti minimi'</i>	XI
Tabella 2:	<i>Principali iniziative e strategie in ambito di sostenibilità ambientale</i>	5
Tabella 3:	<i>Metodi di approccio alla WLC dei principali paesi europei. Rielaborazione personale su tabella tratta da Graaf & Broer, 2023 p.14</i>	11
Tabella 4:	<i>Confronto ulteriore indicazioni e approcci paesi europei, elaborazione personale</i>	13
Tabella 5:	<i>Obiettivi di riduzione delle emissioni (a cura di Pattern Spa); rielaborazione personale</i>	36
Tabella 6:	<i>Ruoli Processo integrato (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)</i>	41
Tabella 7:	<i>Sito e trasporti (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)</i>	41
Tabella 8:	<i>Sostenibilità del sito (a cura di (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)</i>	42
Tabella 9:	<i>Efficientamento idrico (a cura di (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)</i>	43
Tabella 10:	<i>Energia ed emissioni atmosferiche (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)</i>	43
Tabella 11:	<i>Metodo di calcolo utilizzato per i moduli considerati nello studio</i>	63

Tabella 12:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli A1-A3</i>	65
Tabella 13:	<i>Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali</i>	66
Tabella 14:	<i>Rielaborazione tabella riferita alle tipologie di mezzi utilizzati nel trasporto da da Andreotti J., Giordano R., 2024</i>	66
Tabella 15:	<i>Rielaborazione tabella riferita alle tipologie di mezzi utilizzati nel trasporto in relazione al consumo del carburante e alla portata massima da Andreotti J., Giordano R., 2024. Dove: A=consumo del carburante del mezzo vuoto; B= differenza tra il veicolo a pieno carico e il veicolo vuoto; C= carico utile massimo del mezzo (portata)</i>	67
Tabella 16:	<i>Rielaborazione della tabella inerente agli scenari di trasporto da Andreotti J., Giordano R., 2024</i>	67
Tabella 17:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo A4</i>	68
Tabella 18:	<i>Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali</i>	68
Tabella 19:	<i>Mezzi utilizzati in cantiere con le relative emissioni di CO₂, CH₄ e la loro portata oraria</i>	69
Tabella 20:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo A5</i>	69
Tabella 21:	<i>Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali</i>	70
Tabella 22:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli A1-A5</i>	70
Tabella 23:	<i>Durata degli elementi e dei materiali del progetto</i>	71
Tabella 24:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B4</i>	71
Tabella 25:	<i>Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali</i>	71
Tabella 26:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B6_{SF}</i>	75
Tabella 27:	<i>Stima fattori di emissione per anni successivi al 2050</i>	75
Tabella 28:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B6_{SV}</i>	76
Tabella 29:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B7</i>	77
Tabella 30:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo C1</i>	77
Tabella 31:	<i>Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo C2</i>	79
Tabella 32:	<i>Calcolo emissioni CO2 equivalente dei materiali destinati a scarica</i>	80

Tabella 33: Tabella per il calcolo dei moduli C3-C4	80	Tabella 48: Calcolo emissioni OC_{B7} Operational Water	114
Tabella 34: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli C3-C4	80	Tabella 49: EPD selezionati e rispettivi codici di riferimento	114
Tabella 35: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli C1-C4	82	Tabella 50: Calcolo emissioni del trasporto dei rifiuti ai centri di trattamento e/o discarica	117
Tabella 36: Target per l'EC iniziale, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon	84	Tabella 51: Calcolo emissioni totali del trattamento per ciascuna tipologia di rifiuto del caso di studio	117
Tabella 37: Target per il Life Cycle EC, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon	84		
Tabella 38: Emissioni dei materiali di progetto in ordine decrescente dal più impattante	90		
Tabella 39: Riduzioni delle emissioni di CO_2eq a fronte delle strategie per i moduli A1-A3, B4	93		
Tabella 40: Confronto emissioni fase B6 calcolata con fattori di emissione fissi e variabili	95		
Tabella 41: Emissioni di $tonCO_2eq$ stoccata in base all'impianto delle specie arboree selezionate	101		
Tabella 42: Fattori di emissione per tipologia di risorsa energetica impiegata. Tratto dalla pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Giordano e Andreotti.	111		
Tabella 43: Calcolo OC_{B6} dettagliata in relazione al singolo servizio energetico previsto in scenario costante.	111		
Tabella 44: Fattore di emissione calcolati per il periodo di riferimento dal 2025 al 2075, integrando rispetto ai valori presenti nella pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Giordano e Andreotti.	111		
Tabella 45: Calcolo OC_{B6} dettagliata in relazione al singolo servizio energetico previsto in scenario variabile.	113		
Tabella 46: Riferimenti l/persona giorno acqua chiara per destinazione d'uso considerati da certificazione LEED	113		
Tabella 47: Affollamenti da progetto considerati per il calcolo dell'Operational Water B7	113		

Glossario

Accordo di Parigi

Trattato internazionale sul cambiamento climatico adottato nel 2015 durante la COP21, con l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2°C, se non addirittura di rimanere al di sotto dell'incremento di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. Coinvolge quasi tutti i paesi del mondo e si basa su piani d'azione nazionali (NDC) che devono essere aggiornati ogni cinque anni. Non impone degli obblighi legali ai sottoscrittori, ma i Paesi che vi aderiscono si impegnano a promuovere la cooperazione al fine di raggiungere il contenimento del riscaldamento globale¹.

1. ZEROCO2, Le parole della sostenibilità, <https://zeroco2.eco/it/glossario/>, visionato il 10/06/2025

Business As Usual (BAU)

Scenario di riferimento basato sull'assunzione che non vengano implementate nuove politiche e/o misure di mitigazione per il cambiamento climatico, quindi con le emissioni dei gas serra e i valori di altri indicatori ambientali destinati ad aumentare. Questo scenario viene impiegato per confrontare le strategie alternative proposte per raggiungere gli obiettivi climatici².

2. IPCC, Glossary, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>, visionato il 10/06/2025

Circular Economy (CE)

L'economia circolare è un modello economico che promuove il riutilizzo, la riparazione, il riciclo e il ricondizionamento di materiali e prodotti, prolungandone il ciclo di vita e riducendo i rifiuti. Nel contesto dell'Embodied Carbon, valuta gli impatti ambientali e i benefici dei processi di recupero e riciclo. Nell'edilizia, viene analizzata nella fase D – oltre il ciclo di vita – separatamente dalle altre fasi³.

3. Andreotti J., Giordano R., Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio., 2024, p.20

Classe energetica

Le attuali classi energetiche si stabiliscono confrontando l'edificio o l'appartamento reale con un *Edificio di Riferimento*. Questo modello teorico è dotato di caratteristiche dell'involucro edilizio che rispettano le prestazioni energetiche richieste dalla normativa e impiega soluzioni impiantistiche basate sulle tecnologie più comuni per la produzione di caldo e freddo nel contesto edilizio italiano, definite come *standard*, ovvero coerenti con i requisiti minimi di legge vigenti al momento della valutazione. Ad oggi lo standard è definito dal D.M. 26 giugno 2015 con gli allegati tecnici ad esso associati.

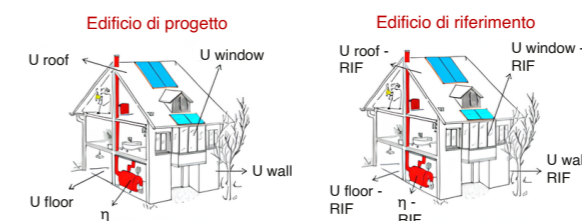


Figura 1: Tratta da ANIT, Articolo di Neo Eubios 51 <https://www.anit.it/pubblicazione/neo-eubios-51/>

Le prestazioni energetiche dell'Edificio di Riferimento vengono assunte come valore massimo di riferimento per la classe A1. L'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EPgl,nren) dell'Edificio di Riferimento è fissato a 1,00, e corrisponde al limite superiore della classe A1. Partendo da questo valore vengono calcolati anche i limiti delle altre classi energetiche diminuendo in modo proporzionale fino alla G:

Tabella 1: Tratta da D.M. 26 giugno 2015 'Requisiti minimi'⁴

	CLASSE A4	<= 0.40 EP gl, nren, rif, standard
0,40 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE A3	<= 0.60 EP gl, nren, rif, standard
0.60 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE A2	<= 0.80 EP gl, nren, rif, standard
0.80 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE A1	<= 1.00 EP gl, nren, rif, standard
1.00 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE B	<= 1.20 EP gl, nren, rif, standard
1.20 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE C	<= 1.50 EP gl, nren, rif, standard
1.50 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE D	<= 2.00 EP gl, nren, rif, standard
2.00 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE E	<= 2.60 EP gl, nren, rif, standard
2.60 EP gl, nren, rif, standard <	CLASSE F	<= 3.50 EP gl, nren, rif, standard
	CLASSE G	> 3.50 EP gl, nren, rif, standard

4. Gazzetta Ufficiale italiana, Decreto interministeriale 26 giugno 2015

Co₂alizione Italia

Iniziativa nata nel 2022 che riunisce aziende italiane impegnate concretamente nella transizione verso la neutralità climatica. Le imprese partecipanti modificano il proprio statuto per includere tra gli obiettivi aziendali la riduzione delle emissioni di gas serra, affiancando la sostenibilità al profitto. Attraverso un percorso condiviso di formazione, confronto e strumenti scientifici, la rete promuove azioni misurabili di decarbonizzazione, inclusa la rendicontazione annuale dei progressi, l'integrazione della filiera produttiva e l'impegno attivo per politiche climatiche più ambiziose⁵.

5. Co₂alizione, <https://co2alizione.eco/it/home>, visionato il 10/06/2025

Compensazione (di CO₂)

Azioni utili alla decarbonizzazione del manufatto edilizio, come ad esempio l'acquisto

di crediti di carbonio, finanziamento di progetti che riguardano la riforestazione, investimento in progetti che riguardano energie rinnovabili⁶.

Comunità energetica rinnovabile

Insieme di cittadini, piccole e medie imprese, enti territoriali e autorità locali, incluse le amministrazioni comunali, le cooperative, gli enti di ricerca, gli enti religiosi, quelli del terzo settore e di protezione ambientale, che condividono l'energia elettrica rinnovabile prodotta da impianti nella disponibilità di uno o più soggetti associatisi alla comunità.

In una CER l'energia elettrica rinnovabile può essere condivisa tra i diversi soggetti produttori e consumatori, localizzati all'interno di un medesimo perimetro geografico, grazie all'impiego della rete nazionale di distribuzione di energia elettrica, che rende possibile la condivisione virtuale di tale energia.

Conference of Parties (COP)

Assemblea annuale che si tiene dal 1992 e riunisce gli Stati firmatari della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), con l'obiettivo di negoziare strategie condivise per affrontare la crisi climatica. Ogni COP è ospitata da un Paese diverso che assume la presidenza del vertice. Questi incontri hanno dato vita a importanti accordi internazionali quali il Protocollo di Kyoto (1997) e l'Accordo di Parigi (2015) e nonostante la complessità tecnica delle trattative, la COP costituisce un momento centrale per la diplomazia climatica globale, coinvolgendo sempre più un numero crescente di attori istituzionali e civili⁷.

Credito di carbonio

Unità certificata che corrisponde al diritto di emettere una tonnellata di anidride carbonica o di un altro gas serra equivalente, calcolato in base al suo potenziale di riscaldamento globale. I crediti di carbonio sono stati introdotti con il Protocollo di Kyoto nel 1997 e possono essere generati da progetti che riducono, evitano o rimuovono emissioni, come la produzione di energia rinnovabile o la riforestazione. Questi crediti sono impiegati, specialmente nei mercati volontari, da imprese che desiderano compensare le proprie emissioni e contribuire al raggiungimento della neutralità climatica. Affinché un credito sia valido, è necessaria la verifica da parte di enti terzi che ne attestino l'effettiva efficacia e l'addizionalità, ovvero il fatto che il beneficio ambientale non sarebbe avvenuto senza il supporto economico derivante dal credito stesso⁸.

Edificio a emissioni zero

Si tratta di un edificio con prestazioni energetiche elevate, calcolate secondo specifici criteri normativi. Questo tipo di costruzione ha un fabbisogno energetico nullo o molto basso, non produce emissioni di carbonio da combustibili fossili in loco e riduce al minimo o azzerava le emissioni operative di gas⁹.

Embodied Carbon (EC)

Denominato anche come carbonio incorporato, l'Embodied Carbon (EC) indica la quantità di gas serra rilasciati, stoccati, rimossi e compensati in una o più fasi del ciclo di vita. Questo valore è espresso in chilogrammi di anidride carbonica equivalente (kgCO₂eq)¹⁰.

Energia primaria

L'energia, proveniente da fonti rinnovabili o non rinnovabili, che viene impiegata nel suo stato originale senza subire processi di trasformazione o conversione¹¹.

ESG (Environmental, Social, and Governance)

Insieme di criteri non finanziari utilizzati per valutare la sostenibilità e la responsabilità complessiva di un'impresa o di un'attività economica. L'approccio ESG prende in considerazione tre ambiti chiave: l'impatto ambientale (come l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni), l'aspetto sociale (inclusione, diritti dei lavoratori e condizioni di lavoro), e la governance, cioè la qualità della gestione aziendale, la trasparenza e l'integrità etica. Sempre più adottato da investitori e imprese, questo modello si propone di integrare valori etici e obiettivi di lungo termine nella strategia aziendale, pur presentando alcune sfide nella misurazione oggettiva di alcuni indicatori¹².

Fattore di energia primaria non rinnovabile

Fattore che si ottiene dividendo X "energia primaria" proveniente da fonti non rinnovabili associata a un dato vettore energetico, compresa l'energia effettivamente erogata e i costi generali di fornitura fino ai punti di utilizzo, con Y energia finale che quel vettore fornisce all'utente¹³.

Fattore di energia primaria rinnovabile

Fattore ottenuto dividendo X l'energia primaria prodotta da fonti rinnovabili,

proveniente da una fonte energetica locale, erogata attraverso un determinato vettore energetico, (incluso sia l'energia effettivamente utilizzata che i costi generali di fornitura fino ai punti di utilizzo) con Y l'energia effettivamente erogata al punto di utilizzo¹⁴.

14. Parlamento Europeo, 2024, p.16

Fattore di energia primaria totale

La somma dei fattori di energia primaria totale, comprendente sia fonti rinnovabili sia non rinnovabili, associata a un determinato vettore energetico¹⁵.

15. *Ibidem*

Fabbisogno energetico

L'energia necessaria da fornire ad un ambiente controllato per mantenere le condizioni climatiche desiderate per un determinato intervallo di tempo, senza considerare eventuali perdite di efficienza del sistema tecnico dell'edificio.

Nel caso specifico del fabbisogno energetico legato all'uso ordinario dell'edificio, l'energia primaria di cui si occorre viene determinata tramite calcolo considerando i servizi di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione¹⁶.

16. *Ivi*, p.19

FSC

Attestazione riconosciuta a livello internazionale che garantisce la provenienza del legno e dei suoi derivati da foreste gestite in modo sostenibile, da materiali riciclati o da fonti controllate. Rilasciata da un ente terzo accreditato, la certificazione si basa su criteri ambientali e sociali rigorosi, che assicurano la tutela della biodiversità, il rispetto dei diritti delle comunità locali e condizioni di lavoro eque. Il sistema FSC prevede la tracciabilità del materiale lungo tutta la filiera, attraverso la cosiddetta "Catena di Custodia", che assicura che ogni passaggio del processo produttivo, dalla raccolta alla distribuzione, rispetti gli standard stabiliti. Le etichette FSC identificano i prodotti in base alla loro composizione: "FSC 100%", "FSC Riciclato" e "FSC Mix"¹⁷.

17. ZERO CO₂, visionato il 10/06/2025

Glasgow Climate Pact

Intesa globale raggiunta durante la Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2021 (COP26), quasi 200 Paesi si uniscono con l'obiettivo di rafforzare l'azione climatica e sostenere finanziariamente la transizione ecologica. È il primo accordo multilaterale sul clima che esprime

esplicitamente la necessità di ridurre progressivamente l'uso del carbone e i sussidi ai combustibili fossili. Il patto riafferma l'impegno a contenere l'aumento della temperatura globale entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali, promuove la revisione degli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni entro il 2030 e sollecita i Paesi industrializzati ad aumentare i fondi per l'adattamento climatico nei Paesi in via di sviluppo¹⁸.

Green Deal

Il Green Deal europeo è un insieme di iniziative e politiche adottate dall'Unione Europea con l'obiettivo di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. Questo piano prevede una transizione ecologica che coinvolge settori chiave, promuovendo la riduzione delle emissioni di gas serra, l'uso efficiente delle risorse e la tutela della biodiversità¹⁹.

Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)

Alleanza globale di riferimento per i Governi del settore privato, la società civile, la ricerca e le organizzazioni intergovernative impegnate nella visione comune di un settore edilizio e costruzioni a emissioni zero, efficienti e resilienti.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Organizzazione internazionale istituita nel 1988 dalle Nazioni Unite per studiare il cambiamento climatico con l'obiettivo di fornire una valutazione scientifica completa e obiettiva sullo stato attuale delle conoscenze sui cambiamenti climatici, i loro impatti e le possibili soluzioni. Tutti i Paesi membri delle Nazioni Unite possono partecipare alla valutazione e alla revisione delle ricerche con l'obiettivo di comprendere il cambiamento climatico su base scientifica²⁰.

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

Protocollo di certificazione energetica e di sostenibilità per edifici e aree territoriali. È promosso dallo U.S. Green Building Council, ma costituisce uno standard a livello internazionale²¹.

Low Energy Transformation Initiative (LETI)

Rete volontaria di professionisti che nasce nel 2017 come London Energy Transformation Initiative con lo scopo di portare il patrimonio edilizio esistente di Londra verso l'obiettivo zero emissioni. Successivamente, amplia il suo target a

18. In a Bottle, Galeone S., Cos'è Il Glasgow Climate Pact, 2021, <https://www.inabottle.it/ambiente/cos-e-glasgow-climate-pact> visionato il 12/06/2025

19. Consiglio Europeo, Green Deal europeo, <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/>, visionato l'8/12/2024, aggiornato al 3/12/2024

20. IPCC; Che cos'è l'IPCC, <https://ipccitalia.cmcc.it/cose-ipcc/>, visionato l'8/12/2024

21. Green Building Council Italia, Sistemi LEED, <https://gbccitalia.org/certificazione/leed/>, visionato il 9/12/2024

tutto il Regno Unito cambiando il suo nome in Low Energy Transformation Initiative (LETI)²².

22. LETI, About, <https://www.leti.uk/about>, visionato il 9/12/2024

National Determined Contributions (NDC)

Impegni che ogni Paese ha assunto sottoscrivendo l'accordo di Parigi. Infatti, secondo l'articolo 4 paragrafo 2, ad ognuna delle parti si richiede di delineare comunicare le strategie di mitigazione che hanno intenzione di mettere in atto. Gli NDC sono stati introdotti per contribuire al raggiungimento dell'obiettivo dell'Accordo di Parigi, ossia limitare l'aumento della temperatura globale a +1,5 °C²³.

23. UNFCCC, Nationally Determined Contributions (NDCs), <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>, visionato il 9/12/2024

Operational Carbon (OC)

Denominato anche come carbonio operativo, l'Operational Carbon (OC) indica la quantità di gas serra rilasciati o evitati nei moduli B6, B7 e D2 del ciclo di vita, ovvero relativi al fabbisogno energetico, idrico e alla cessione alla rete di energia elettrica autoprodotta in eccedenza rispetto al fabbisogno energetico del manufatto edilizio. Questo valore è espresso in kilogrammi di anidride carbonica equivalente normalizzato al kilowatt all'ora (kgCO₂eq/kWh) per l'energia oppure al volume dell'acqua (kgCO₂eq/m³)²⁴.

24. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.18

Potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential GWP)

Indicatore che misura l'impatto potenziale di una sostanza climalterante sul riscaldamento globale lungo un periodo di riferimento.

Protocollo di Kyoto

Accordo internazionale adottato nel 1997 nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, che per la prima volta ha imposto obblighi giuridicamente vincolanti ai Paesi industrializzati per la riduzione delle emissioni di gas serra. In vigore dal 2005, il protocollo stabiliva l'obiettivo di tagliare le emissioni del 5% rispetto ai livelli del 1990 nel periodo 2008-2012, consentendo l'uso di strumenti flessibili come il mercato delle emissioni. Sebbene rappresenti una tappa fondamentale nella diplomazia climatica, la sua efficacia è stata limitata anche dall'assenza di alcuni grandi emettitori tra i firmatari, come gli Stati Uniti. Il Protocollo ha comunque posto le basi per lo sviluppo di accordi successivi, tra cui l'Accordo di Parigi del 2015²⁵.

25. ZERO CO₂, visionato il 10/06/2025

Rifiuti da Costruzione e demolizione

I rifiuti da costruzione e demolizione sono i materiali di scarto generati dalle attività legate alla costruzione, manutenzione, demolizione e decostruzione di edifici e infrastrutture civili. La composizione di questi rifiuti cambia molto a seconda del tipo di cantiere, rendendo difficile definire modelli affidabili per il consumo dei materiali o per i tassi di produzione di rifiuti, sia per persona, che per progetto o per metro quadrato di superficie calpestabile²⁶.

26. Styles, D., Schoenberger, H., Zeschmar-Lahl, B., Gálvez-, & Gálvez-Martos, J.-L. Construction and demolition waste best management practice in Europe, 2018, p.167

Science Based Target (SBT)

Piano volontario che comunica chiaramente le strategie, mostra alle aziende quanto e con quale rapidità devono ridurre le loro emissioni di gas serra per evitare i peggiori effetti del cambiamento climatico²⁷.

27. United Nations Environment Programme, Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction, 2024, p. 58

Sistemi BMS (Building Management System)

Sistema digitale composto da dispositivi hardware e software interconnessi, progettato per monitorare, controllare e ottimizzare in modo centralizzato il funzionamento degli impianti di un edificio. Un BMS consente al personale tecnico di gestire da una sola piattaforma diversi sistemi, come climatizzazione, illuminazione, sicurezza e rete elettrica, raccogliendo dati da sensori e dispositivi presenti nella struttura. Sebbene non dotato di intelligenza artificiale, permette l'automazione di numerose funzioni e la visualizzazione costante delle condizioni operative, contribuendo a migliorare l'efficienza gestionale e la tempestività degli interventi²⁸.

28. Ingenio, Bracci E., Cos'è e come scegliere un Building Management System (BMS) per lo smart building, 2022, <https://www.ingenio-web.it/articoli/cos-e-e-come-scegliere-un-building-management-system-bms-per-lo-smart-building/> visionato il 12/06/2025

United Nations Office for Project Services (UNOPS)

Ufficio delle Nazioni Unite che offre supporto nell'approvvigionamento e nella gestione dei progetti promossi dalle agenzie ONU²⁹.

29. UNOPS, Our story, <https://www.unops.org/about>, visionato il 9/12/2024

UN-Habitat

Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani che ha il compito di promuovere la sostenibilità sociale e ambientale delle città e dei paesi³⁰.

30. UN-Habitat, About us, <https://unhabitat.org/about-us>, visitato il 9/12/2024

Whole Life Carbon

Rappresenta il bilancio complessivo delle emissioni di carbonio equivalente legate a un edificio, considerando sia l'Operational Carbon (OC), sia l'Embodied Carbon (EC). L'analisi WLC adotta un approccio cradle-to-grave, valutando tutte le emissioni

e gli assorbimenti di CO₂eq lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. Per una corretta valutazione, è fondamentale individuare e selezionare le fasi del ciclo di vita da considerare, scegliere i database di riferimento e definire con precisione lo scenario temporale da utilizzare nei calcoli³¹.

31. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.8 e p.208

World Green Building Council (WorldGBC)

Organizzazione no-profit, nata dal primo Green Building Council fondato nel 1993 negli Stati Uniti, che si occupa della sostenibilità e della decarbonizzazione degli ambienti costruiti dalla scala locale a quella globale³².

32. World Green Building Council, Our mission, <https://worldgbc.org/about-us/our-mission/>, visionato il 9/12/2024

Introduzione

Il settore delle costruzioni rappresenta uno dei principali ambiti di intervento nella lotta al cambiamento climatico essendo responsabile di una significativa quota delle emissioni globali di gas serra³³. Il perseguimento degli obiettivi climatici fissati dall'Accordo di Parigi e dal Green Deal Europeo richiede un'azione mirata e tempestiva per decarbonizzare l'intero ciclo di vita degli edifici. In tale contesto, l'analisi della *Whole Life Carbon* (WLC) costituisce uno strumento fondamentale per valutare e ridurre le emissioni di carbonio incorporate (*Embodied Carbon*) e operative (*Operational Carbon*), offrendo un approccio olistico alla sostenibilità.

Questa tesi si pone l'obiettivo di applicare la metodologia WLC a partire dal documento "Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio", 2024 di Andreotti J. e Giordano R. a un caso di studio reale, ponendo particolare attenzione alle emissioni operative legate agli impianti e alla fase di fine vita dell'edificio. L'obiettivo principale è evidenziare le connessioni tra transizione energetica, economia circolare e strategie di decarbonizzazione.

A partire da un'analisi dello stato dell'arte, il lavoro esamina le normative e le strategie internazionali, europee e nazionali relative alla decarbonizzazione degli edifici. Successivamente viene delineato un quadro metodologico che integra la valutazione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita con misure di compensazione e tecnologie innovative.

Per l'applicazione della metodologia è stato selezionato come caso di studio il progetto per il nuovo quartier generale di Pattern, azienda italiana di lavorazione tessile per il settore della moda, sita a Collegno in provincia di Torino. Si tratta di un edificio di nuova costruzione che ospiterà uffici, laboratori produttivi e logistici, magazzini ed è stato progettato con particolare attenzione al rispetto di specifici standard ambientali (LEED Gold) richiesti dalla committenza.

33. KyotoClub e Legambiente, Decarbonizzare le costruzioni: la nuova sfida del settore edilizio. 2023, p.4

Organizzazione della ricerca

La ricerca è stata strutturata seguendo una serie di fasi, organizzate in modo sistematico per garantire un'analisi completa ed esaustiva delle emissioni di anidride carbonica equivalente emesse durante tutto il ciclo di vita del fabbricato.

In primo luogo, è stata condotta una ricerca sulle buone pratiche adottate fino ad oggi nel campo degli edifici sostenibili. Questa fase ha permesso di acquisire una panoramica delle soluzioni politiche e tecnologiche più avanzate, con particolare attenzione all'efficienza energetica, alla riduzione delle emissioni di gas serra e all'uso sostenibile delle risorse.

Successivamente, si è focalizzata l'attenzione sul contesto italiano, analizzando le normative vigenti e le principali strategie adottate nel settore delle costruzioni sostenibili. Questo passaggio è stato fondamentale per comprendere le specificità locali e individuare eventuali discrepanze rispetto agli standard internazionali.

Il documento Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio (Andreotti J., Giordano R., 2024) è stato preso come riferimento metodologico per il calcolo della WLC del caso di studio, poichè fornisce un approccio coerente al contesto italiano.

Per l'applicazione della metodologia è stato selezionato come caso studio il progetto per il nuovo quartier generale di Pattern, azienda italiana di lavorazione tessile per il settore della moda. Si tratta di un edificio di nuova costruzione, progettato con particolare attenzione al rispetto di specifici standard ambientali richiesti dalla committenza

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i seguenti strumenti a supporto del calcolo:

- fogli di calcolo Excel appositamente strutturati per gli impatti incorporati (Embodied Carbon)
- software Edilclima per la modellazione delle prestazioni energetiche e di conseguenza per gli impatti operativi (Operational Carbon).

La selezione di questi strumenti si è basata sulla loro affidabilità, accuratezza e capacità di soddisfare i requisiti della ricerca.

L'applicazione della metodologia al caso studio ha prodotto risultati concreti in termini di prestazioni energetiche e impatto ambientale. I dati elaborati hanno permesso di valutare l'efficacia delle strategie adottate e di identificare possibili

miglioramenti.

Infine, è stata effettuata un'integrazione dei risultati ottenuti con strategie di decarbonizzazione e principi di economia circolare. Questo approccio ha evidenziato il ruolo cruciale della circolarità nel settore edilizio con l'obiettivo di accelerare la transizione verso edifici a basse emissioni di carbonio e più sostenibili.

1. Obiettivo zero emissioni per il settore delle costruzioni

In questo capitolo viene fornita una panoramica teorica e metodologica sul tema della sostenibilità nel settore delle costruzioni, riferendosi alle normative, alle strategie e agli strumenti necessari per raggiungere la neutralità climatica e promuovere l'economia circolare. Dopo un'introduzione sullo stato dell'arte e sugli obiettivi globali, europei e nazionali di riduzione delle emissioni, il testo si concentra su approcci come la Whole Life Carbon Analysis e la Circular Economy. Questi strumenti sono fondamentali per valutare e ridurre le emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita degli edifici, ricorrendo anche all'impiego di misure di compensazione per bilanciare l'impatto residuo. Infine, si sottolinea l'importanza di un approccio integrato che coinvolga tutti gli attori della filiera edilizia verso progetti realmente sostenibili e in linea con le roadmap climatiche internazionali.

Il raggiungimento di zero emissioni per il settore delle costruzioni si colloca all'interno di un ampio contesto, delineato da iniziative globali come l'Accordo sul Clima di Parigi del 2015 e del Glasgow Climate Pact sottoscritti dai governi mondiali per contrastare i cambiamenti climatici e limitare l'innalzamento della temperatura terrestre entro il 2050 a non oltre 1,5°C¹. Per raggiungere questi obiettivi sono stati adottati diversi strumenti e azioni a supporto di politiche orientate alla transizione energetica e alla decarbonizzazione, finalizzate alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica e altri gas serra dannosi per l'atmosfera². Il Rapporto Global Status Report for Buildings and Construction del 2023 sullo stato globale degli edifici e delle costruzioni evidenzia che il settore edile non è in linea con gli obiettivi fissati dall'Accordo di Parigi del 2015³. La transizione verso edifici resilienti e a zero emissioni, prevista entro il 2050, sta procedendo più lentamente del previsto. Attualmente, il settore delle costruzioni rappresenta il 37% delle emissioni globali annue di CO₂eq e registra un costante aumento dei consumi energetici, che nel 2022 hanno raggiunto circa il 30% del totale mondiale.

Le emissioni derivano sia dalla produzione dei materiali da costruzione che dalle operazioni di riscaldamento e raffreddamento degli edifici. Per centrare l'obiettivo di riduzione del 50% delle emissioni di carbonio entro il 2030, diventa indispensabile accelerare la transizione energetica verso fonti rinnovabili, supportata da politiche e incentivi finanziari mirati.

EMISSIONI PER SETTORE 2022

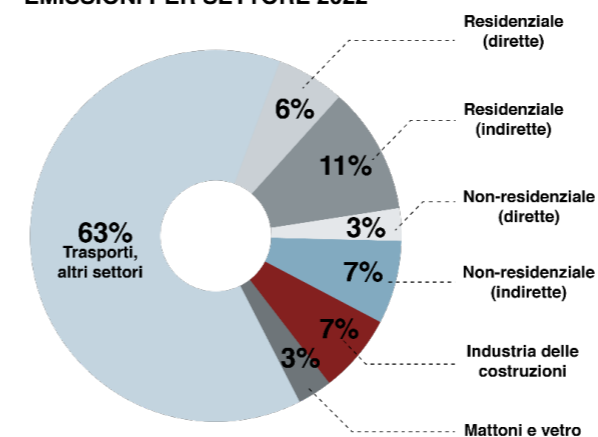


Figura 2: Percentuali di incidenza delle emissioni di CO₂eq per ciascun settore tratta da United Nations Environment Programme, 2024 p. 10

Le politiche degli Stati contraenti dovrebbero concentrarsi maggiormente sul retrofit degli edifici esistenti e sulla riduzione dell'Embodied Carbon (EC) nei materiali da costruzione, orientando il mercato già a partire dalla fase di produzione, così da incentivare l'offerta di soluzioni a minore impatto ambientale⁴. Le collaborazioni intersettoriali, specialmente con ricercatori e ONG, giocano un ruolo fondamentale nel fornire dati scientifici che guidino le decisioni politiche. Un esempio rilevante è la Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), che ha sviluppato, in collaborazione con UNOPS e UN-Habitat, metodologie e strumenti per supportare i paesi verso la decarbonizzazione⁵. Il framework fa riferimento alla Conference of Parties di Parigi (COP21) e comprende quattro obiettivi trasversali a cinque settori d'azione che coprono l'intera catena del valore e il ciclo di vita degli edifici (WLC):

1. Andreotti J., Giordano R., Decarbonizzazione dei manufatti edili: metodologie per la valutazione della Whole Life Carbon e focus sulla fase di fine vita, 2023, p.28

2. Ivi, p.207

3. United Nations Environment Programme. Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction, 2024..

4. United Nations Environment Programme, 2024, p. 10

5. Ivi, p. 13,15

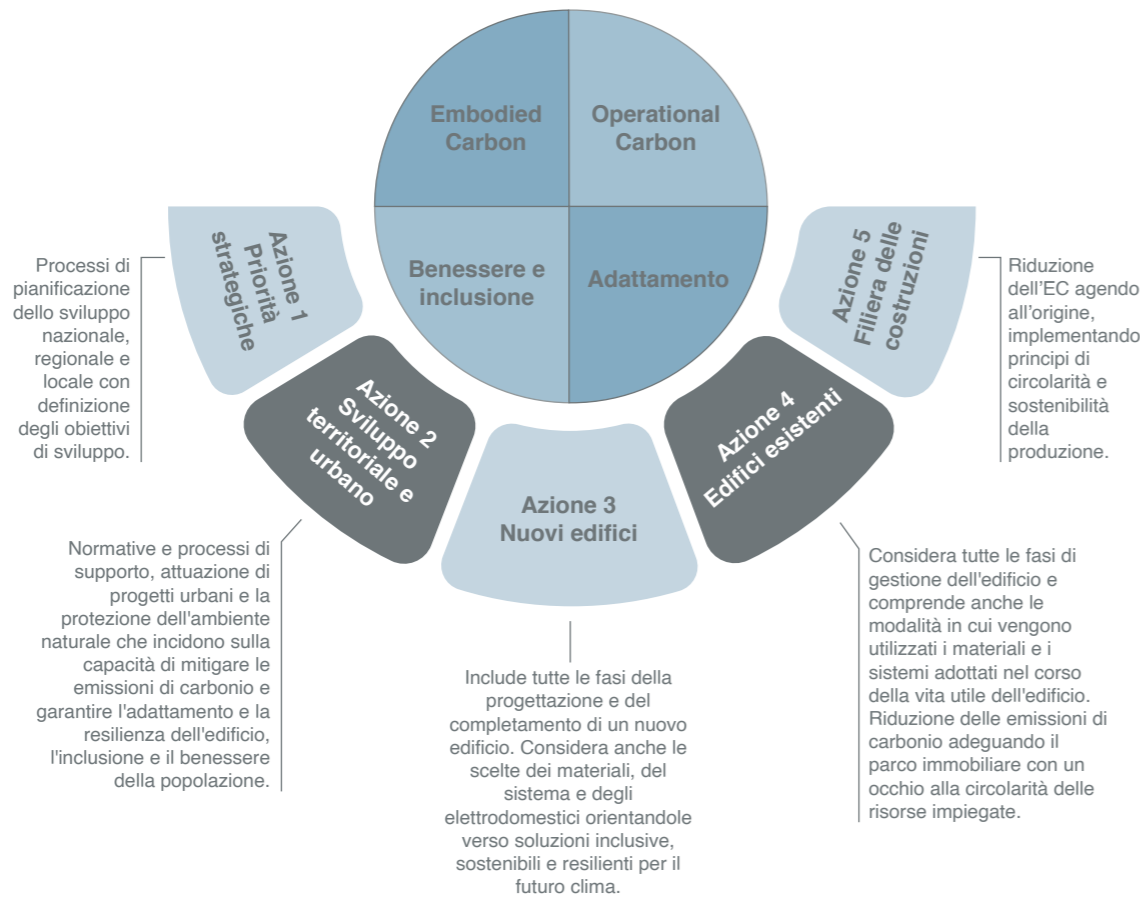


Figura 3: Rielaborazione organizzazione framework COP21

Ogni area può essere implementata indipendentemente, coinvolgendo specifici gruppi di stakeholder.

Per monitorare i progressi degli edifici di tutto il mondo verso la decarbonizzazione, nel 2020 è stato pubblicato per la prima volta il Global Buildings Climate Tracker (GBCT). Si tratta di uno strumento di raccolta dati composto in sette parti, il quale fornisce una fotografia delle azioni intraprese dal 2015 al 2022, ultimo anno utile di cui si hanno i dati e analisi complete, misurando i progressi rispetto allo scenario di riferimento del 2050 in cui si prevede la totale decarbonizzazione del settore edilizio⁶.

6. United Nations Environment Programme, 2024, p. 12, pp. 49-52, pp. 72-73

1.1. Principali linee guida internazionali, europee e italiane

Tabella 2: Principali iniziative e strategie in ambito di sostenibilità ambientale⁷

Livello	Anno	Iniziativa e strategie	Ambito di applicazione	Breve descrizione
Globale	1997	Protocollo di Kyoto	Riduzione emissioni di gas serra	Primo trattato internazionale che ha introdotto obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni di gas serra per i paesi industrializzati (sostituito dall'Accordo di Parigi).
	2015	Accordo di Parigi	Cambiamenti climatici, mitigazione e adattamento	Obbliga i paesi firmatari a mantenere l'aumento della temperatura globale ben al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali e a perseguire sforzi per limitarlo a 1,5 °C.
	2015	Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile dell'ONU	Sviluppo sostenibile globale (ambiente, economia, società)	Incluye gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), con particolare rilevanza per il cambiamento climatico (SDG 13).
	2023 (ogni 5-7 anni)	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	Scienza climatica, valutazione dei cambiamenti climatici	Produce rapporti scientifici che guidano le politiche climatiche globali.
	2024 (ogni anno)	Conference Of Parties (COP)	Negoziati internazionali su clima ed emissioni	Incontri annuali delle parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) per negoziare politiche climatiche.
	2019	European Green Deal	Neutralità climatica, energia, economia circolare, edilizia	Strategia generale dell'UE per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, includendo azioni su energia, trasporti, agricoltura e industria.
	2024	Energy Performance of Building Directive 2024/1275 (EPBD IV)	Efficienza energetica negli edifici	Definisce le strategie per migliorare la prestazione energetica degli edifici, con l'obiettivo di contribuire al raggiungimento degli obiettivi climatici del green deal europeo.
	2021	Regolamento Europeo sul Clima	Obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni	Trasforma in legge l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050 e stabilisce un target intermedio di riduzione delle emissioni del 55% entro il 2030 (rispetto al 1990).
	2003	Sistema di Scambio delle Emissioni dell'UE (EU ETS)	Mercato delle emissioni di carbonio	Schema di mercato per limitare le emissioni di CO ₂ di settori specifici (energia, industria, aviazione).
	2015	Strategia UE sull'Economia Circolare	Gestione risorse e rifiuti, edilizia circolare	Integrazione di azioni per la sostenibilità dei materiali e il riuso nell'ambito del Green Deal.
2019	Aggiornamento del 2024 del Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR) del 2019	Norme ambientali sui materiali da costruzione	Introduce obblighi di sostenibilità ambientale, digitalizzazione con passaggio digitale, inclusione della stampa 3D e requisiti verdi per appalti pubblici, promuovendo sicurezza, trasparenza e riduzione dell'impatto ambientale nel settore edile.	
2013	Strategia UE sull'Adattamento ai Cambiamenti Climatici	Adattamento climatico, resilienza delle infrastrutture e edifici	Stabilisce azioni per ridurre la vulnerabilità dell'Europa ai cambiamenti climatici.	
Nazionale	(aggiornata 2021)	Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)	Energia rinnovabile, efficienza energetica, clima	Piano decennale che stabilisce obiettivi per il 2030 su riduzione delle emissioni, efficienza energetica e rinnovabili.
	2021	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)	Transizione verde, edilizia efficiente, energia	Finanziato dall'UE, include importanti investimenti per la transizione ecologica, con focus su energia rinnovabile, economia circolare e mobilità sostenibile.
	2019	Legge Clima 2019	Obiettivi climatici nazionali	Introduce misure nazionali per la riduzione delle emissioni di gas serra e il miglioramento della qualità dell'aria.
	2017	Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile (SNSVS)	Sviluppo sostenibile (ambiente, energia, edilizia, economia)	Pianifica azioni su energia, clima, biodiversità e resilienza urbana, in linea con l'Agenda 2030.
	1991	Legge 10/1991	Efficienza energetica negli edifici	Prima normativa italiana che ha introdotto l'obbligo di certificazione energetica degli edifici e misure per il risparmio energetico.
	2023-2024	Decreto Rinnovabili (FER 1 e FER 2)	Energie rinnovabili	Incentivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili.
	2020	Superbonus 110% (Decreto Rilancio 2020)	Riqualificazione energetica e sismica degli edifici	Incentivo fiscale per interventi di efficienza energetica e riduzione delle emissioni negli edifici.
	2014	Decreto Legislativo 102/2014	Efficienza energetica	Recepisce la Direttiva EED sull'efficienza energetica, includendo obblighi di audit energetico per grandi imprese e misure di risparmio energetico.
	2020	Strategia Nazionale di Lungo Termine per la Riqualificazione Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)	Decarbonizzazione edilizia	Definisce obiettivi per la decarbonizzazione del patrimonio edilizio italiano entro il 2050.
	2023		Adattamento climatico	Definisce misure di adattamento per ridurre i rischi climatici e aumentare la resilienza del territorio.

7. Camera dei Deputati - Servizio Studi, 2021, Dossier n° 178 - Schede di lettura.

La tabella presenta una sintesi delle principali strategie e misure adottate per la riduzione delle emissioni e la protezione ambientale nel comparto edilizio.

Le iniziative sono classificate secondo tre livelli istituzionali — globale, europeo e nazionale in riferimento all'Italia — al fine di mettere in luce le interazioni e le dinamiche che caratterizzano l'elaborazione delle politiche ambientali lungo la scala internazionale.

1.1.1. Prospettive globali e approcci nazionali

Sempre durante la COP28 il *World Green Building Council (WorldGBC)* ha presentato il rapporto “Social Impacts across the Built Environment” in cui emerge l'importanza di garantire la resilienza e l'adattamento sia nelle operazioni edilizie che nei materiali utilizzati. Questo documento offre una guida su come il settore edilizio e delle costruzioni può affrontare l'impatto sociale lungo tutto il ciclo di vita degli edifici. *L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* sottolinea che il raggiungimento di questi obiettivi rappresenta una sfida considerevole specialmente nelle economie a basso reddito, dove i vincoli finanziari e le tecniche costruttive possono ostacolare la realizzazione di strutture di questo tipo⁸.

Le pratiche edilizie inadeguate, infatti, possono contribuire al disadattamento, aumentando il consumo energetico e le emissioni di gas serra. Per mitigare tali rischi, è essenziale adottare pratiche di edilizia sostenibile, progettazione passiva e selezionare materiali strategici sulla base di ciascun progetto.

A livello globale a partire dal 2023 sono stati adottati 81 codici energetici nazionali per edifici residenziali e 77 per edifici non residenziali, di cui l'80% è obbligatorio. Tra questi, 20 codici erano stati già aggiornati e adottati dal 2021, di questi 17 codici sono stati sviluppati o rivisti nel 2023. Tuttavia, nonostante l'aumento del numero di codici e dei loro aggiornamenti, oltre il 30% di essi non è stato rinnovato dal 2015 e potrebbero quindi non soddisfare gli attuali standard. Si prevede, inoltre, che circa l'80% della crescita della superficie edificabile entro il 2030 avverrà nelle economie in via di sviluppo e Paesi emergenti, molti dei quali non dispongono dei codici energetici edilizi necessari e delle normative per gestire l'aumento della domanda di energia⁹.

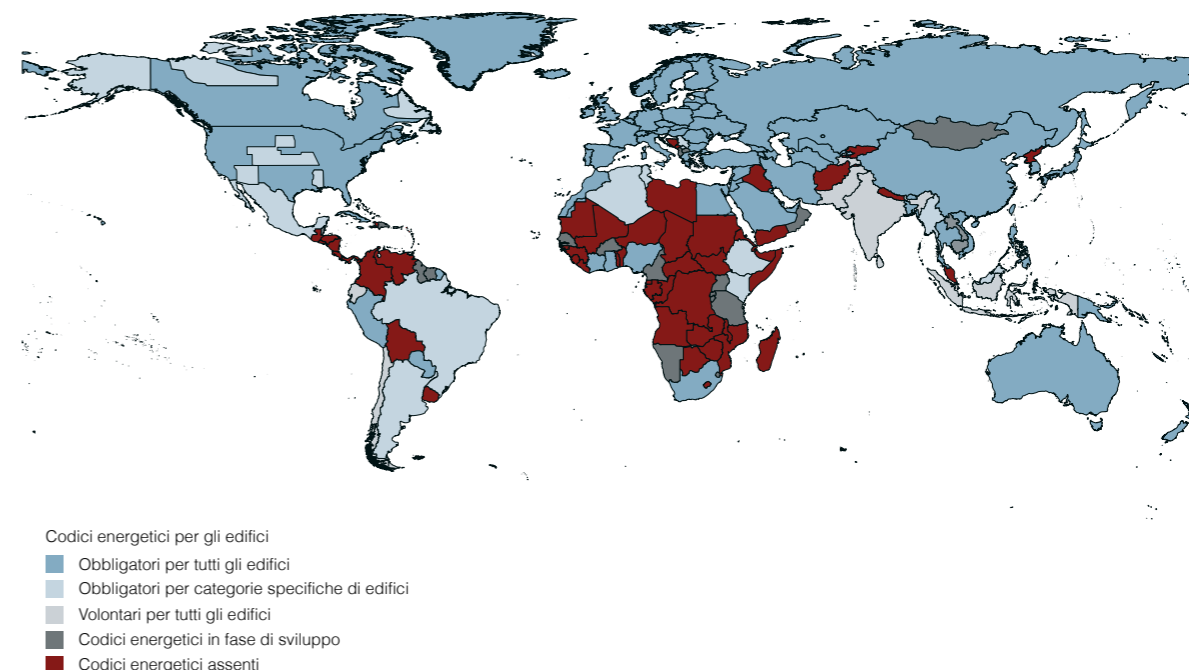


Figura 4: Differenziazione per tipologia e stato di applicazione dei codici energetici per gli edifici. Rielaborazione immagine IEA 2023a contenuta all'interno di United Nations Environment Programme, 2024 p.34.

Ad oggi il Global Status Report for Buildings and Construction, il più recente rapporto globale sullo stato di avanzamento degli edifici e dell'edilizia per il 2024, evidenzia un ritardo significativo nel progresso verso l'obiettivo di zero emissioni nette di carbonio entro il 2050, come stabilito dall'Accordo di Parigi. Attualmente, 161 nazioni devono ancora adottare le tabelle di marcia per l'azione climatica¹⁰. Dal 2010, la superficie totale mondiale degli edifici è aumentata di oltre il 31%, con quasi l'80% di tale crescita attribuibile al settore residenziale. Questo incremento della superficie edificata rappresenta una spinta notevole alla domanda di energia per gli edifici e per i materiali da costruzione. Nonostante i miglioramenti nell'intensità energetica che stanno attenuando l'aumento complessivo della domanda di energia, la crescita edilizia e i cambiamenti negli standard di comfort nelle economie in via di sviluppo continuano a esercitare una pressione significativa. Si stima che oltre la metà di queste nuove costruzioni si trovi in regioni con climi caldi, dove la domanda di raffrescamento degli ambienti è in aumento e l'implementazione dei Codici energetici per gli edifici è ancora incompleta. Esiste il rischio che i miglioramenti nell'efficienza energetica nei climi più freddi possano essere compensati da costruzioni meno efficienti nei climi caldi, dove la domanda di raffreddamento cresce. Inoltre, vi è un potenziale incremento delle emissioni di carbonio se tali economie non accelerano la produzione di energia rinnovabile.

In ambito europeo sono diverse le azioni e sfide intraprese a livello comunitario e dai singoli Stati membri per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione del

8. United Nations Environment Programme, 2024, p.9

9. Ivi, pp. 31-34

10. United Nations Environment Programme, 2024, p. 29

settore delle costruzioni, quali ad esempio il *Green Deal* che definisce gli step per raggiungere l'azzeramento delle emissioni per il 2050 e il *New European Bauhaus* che spinge verso un passaggio a sistemi circolari e a minore intensità di carbonio¹¹.

L'Unione Europea il 12 marzo 2024 ha aggiornato la Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD), stabilendo che entro il 2030 i nuovi edifici dovranno rispettare standard di emissioni zero e prevede di eliminare progressivamente le caldaie alimentate da combustibili fossili entro il 2040¹². Questa revisione della Direttiva EPBD evidenzia come l'Unione Europea possa raggiungere un parco immobiliare a emissioni zero e completamente decarbonizzato entro il 2050, principalmente attraverso l'incremento del tasso di ristrutturazione degli edifici con le peggiori prestazioni in ciascuno Stato membro dell'UE¹³.

I Paesi che hanno già implementato una regolamentazione sul ciclo di vita delle emissioni di gas serra si basano tutti sul quadro europeo volontario per gli edifici sostenibili Level(s) e sulla norma europea UNI EN 15978:2011. Tuttavia, all'interno di questo scenario esiste una certa flessibilità per l'elaborazione di normative a livello nazionale. Di conseguenza, pur essendoci molte somiglianze negli approcci dei Paesi, esistono anche delle differenze. I risultati o i valori limite non sono quindi facilmente confrontabili tra loro, a causa delle diverse scelte nella definizione dei confini del sistema da adottare per il calcolo WLC. Queste differenze sono generalmente giustificate da contesti nazionali e motivazioni come la disponibilità limitata di dati.

La raccolta dei dati per arrivare ai parametri di riferimento condivisi avviene in collaborazione con il mondo scientifico o con attori privati, come i Green Building Council nazionali e vengono valutati attraverso strumenti di calcolo opportunamente sviluppati¹⁴.

11. Andreotti J., Giordano R., 2023, p. 29

12. United Nations Environment Programme, 2024, p. 31

13. Wilson, A.; European Parliamentary Research Service, 2023, p.1

14. Graaf L., Broer R., Regulierung der lebenszyklus-thg-emissionen von gebauden, 2023, p.11. <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2023/09/Regulierung-der-Lebenszyklus-THG-Emissionen-von-Gebauden-DE-Sept-2023.pdf>, visionato il 05/03/2025

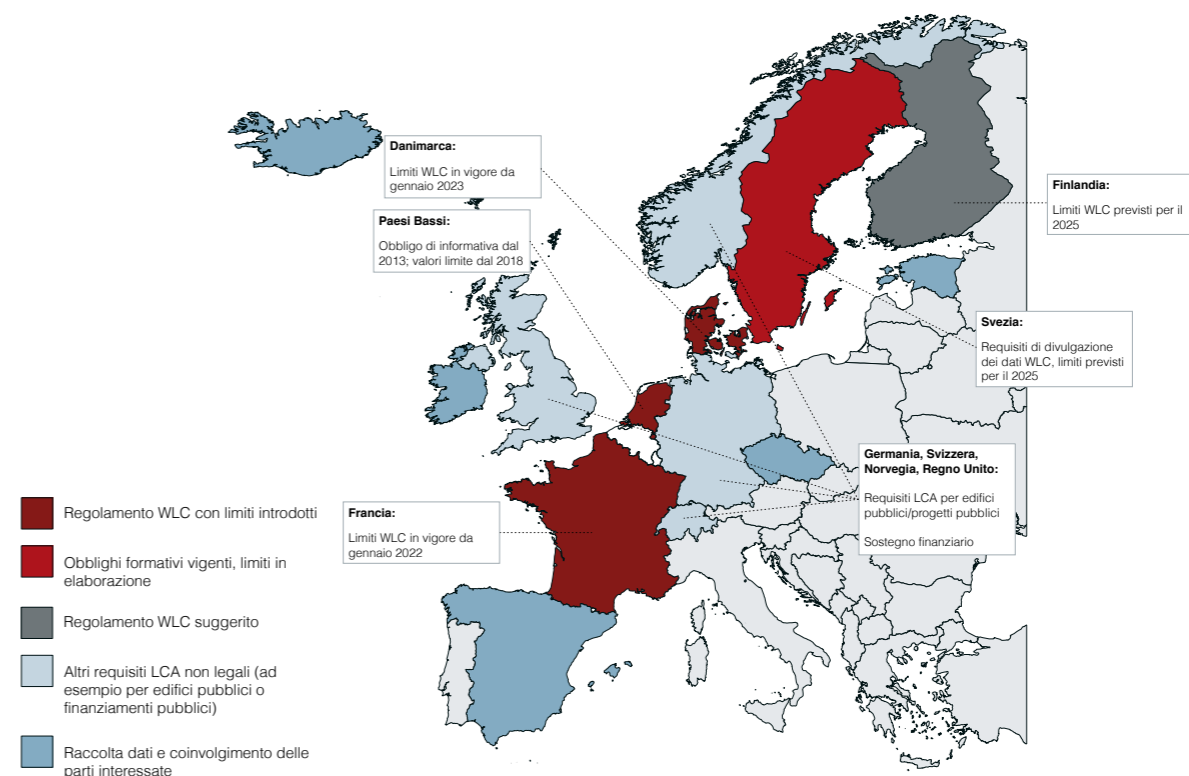


Figura 5: Stato di integrazione delle emissioni di gas serra del ciclo di vita nelle normative di vari paesi europei. Rielaborazione su immagine tratta da Graaf & Broer, 2023 p.7

Occorre ricordare che la riqualificazione degli edifici esistenti richiede spesso interventi che includono la demolizione parziale, l'integrazione di nuovi materiali e componenti tecnici. Tali operazioni generano inevitabilmente quantità significative di rifiuti da Costruzione e Demolizione; a tal proposito si richiama la Direttiva 2018/851, che aggiorna la Waste Framework Directive del 2008, promuovendo l'adozione di processi circolari volti al recupero, riciclo e riutilizzo dei materiali di scarto¹⁵.

Il 30 marzo 2022, la Commissione europea ha presentato una proposta di revisione del Regolamento sui Prodotti da Costruzione, intitolata "CPR - Regulation of the European Parliament and of the Council - Laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011." per poi adottare, il 30 giugno 2023, una posizione condotta negoziata sulla revisione di tale regolamento. Il nuovo quadro normativo ha come obiettivo l'allineamento dei prodotti da costruzione ai principi dell'economia circolare, promuovendone una maggiore durata, facilità di riparazione e riciclabilità a fine vita, prevede inoltre una standardizzazione delle regole per agevolare la commercializzazione dei prodotti da costruzione sul mercato europeo¹⁶.

15. Andreotti J., Giordano R., 2023, p. 29

16. KyotoClub e Legambiente, Decarbonizzare le costruzioni: la nuova sfida del settore edilizio. 2023, pp. 16-17 <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2023/10/Embodied-Carbon-2023.pdf>, visionato il 05/03/2025

1.1.2. Paesi europei: normative a confronto

Le normative nazionali relative ai confini del sistema per il calcolo della WLC e ai componenti considerati degli edifici variano da paese a paese. In generale, i principali elementi costruttivi, come la struttura portante (fondazioni, pilastri, travi, solai) e le partizioni esterne (pareti, coperture, serramenti), sono sempre incluse nel calcolo. Tuttavia, alcuni paesi adottano un approccio più esteso: ad esempio, in Francia vengono considerati anche componenti secondari come i collegamenti elettrici e le finiture decorative.

Per quanto riguarda i moduli del ciclo di vita, Danimarca, Paesi Bassi, Finlandia e Francia includono tutte le fasi del ciclo di vita degli edifici, con leggere variazioni. In Svezia, al momento, è richiesta solo la divulgazione delle emissioni iniziali derivanti dalla produzione e costruzione (A1-A5), ma è previsto un ampliamento futuro per includere altri moduli. La fase di utilizzo (B6) è considerata in Danimarca e Francia.

Le fasi rappresentano le macro-sequenze temporali che comprendono la produzione dei materiali, la costruzione, l'uso e manutenzione, la gestione di fine vita e i benefici potenziali oltre il ciclo di vita. All'interno di ciascuna fase, i moduli definiscono le unità operative di calcolo, specificando i singoli processi che contribuiscono al bilancio emissivo complessivo. Questa struttura è illustrata nel dettaglio nel capitolo 2¹⁷.

La tabella riportata di seguito, che costituisce una rielaborazione di Graaf L., Broer R., *Regulierung der lebenszyklus-thg-emissionen von gebauden*, 2023, restituisce i diversi metodi di approccio all'analisi WLC adottati dai paesi dell'Unione Europea più strutturati per il computo delle emissioni di CO₂eq. Per ciascun Paese sono stati riportati gli ambiti di applicazione, i confini e i componenti da considerare nel calcolo, i moduli del ciclo di vita necessari per la valutazione e i punti chiave dell'analisi stessa. Sono riportate altresì le specifiche dell'LCA richieste, le rispettive banche dati e gli strumenti di calcolo a disposizione dei professionisti.

17. Andreotti J., Giordano R., 2024, p. 24

Tabella 3: Metodi di approccio alla WLC dei principali paesi europei. Rielaborazione personale su tabella tratta da Graaf & Broer, 2023 p.14

Metodo & Dati	Danimarca	Francia	Olanda	Svezia	Finlandia	Germania
Ambito di applicazione	Tutti gli edifici nuovi. Limiti solo per edifici > 1000 mq.	Nuovi edifici residenziali, direzionali e scolastici.	Nuovo residenziale e edifici per uffici più grandi di 100 mq.	Tutti gli edifici nuovi con l'eccezione di specifici edifici ed edifici pubblici. Sviluppatore privato.	Tutti i nuovi edifici tranne case unifamiliari.	Nell'ambito del finanziamento di nuove costruzioni residenziali e non; Edifici comunali.
Componenti e confini del sistema	Sottostruttura, sovrastruttura, progettazione d'interni e tecnica della casa. Tutto descritto nella domanda di concessione edilizia.	Sottostruttura, sovrastruttura, progettazione d'interni e tecnica della casa. Tutto descritto nella domanda di concessione edilizia.	Sottostruttura, sovrastruttura, installazioni.	Sottostruttura, sovrastruttura.	Sottostruttura, sovrastruttura, progettazione d'interni della casa. Confronto con quelli del permesso di costruire.	
Moduli del ciclo di vita	A1-3, B4, B6, C3-4, D	A1-5, B1-B6, C1-4, D	A1-5, B1-B4, C1-4, D	A1-5	A1-3, A4-5, B4, C1-4, D	PER ONG A1-3, B4, B6, C3-4, D (separato)
Requisiti dei dati	Dati governativi da database basato su OKOBAUDAT. Sono consentite anche EPD e schede specifiche di prodotti non presenti nel database.	Dati INIES, include EPD specifiche del prodotto e dati generici.	Database ambientale olandese, impiegato per EPD specifiche del prodotto.	Database ambientale svedese con EPD specifiche e dati generici	Diverse fonti di dati possibili, compresa la banca dati finlandese.	Attuale tabella di calcolo; in futuro OKOBAUDAT.
Punti chiave della WLC	Ciclo di vita senza limiti dei aserra espressi come kgCO ₂ e/m ² /anno.	Emissioni di carbonio incorporato come attività subordinata, espresse individualmente per edifici in kgCO ₂ e/m ² il valore limite è separato per l'energia operativa.	€/mq/anno	In sviluppo.	In sviluppo.	Per il QNG come kgCO ₂ e/m ² /anno.
Specifiche LCA	LCA dettagliata Eccezioni per gli edifici con particolari esigenze funzionali	LCA dinamica Calcolo sotto considerazione di immagazzinaggio CO ₂ biogenica Uso di valori predefiniti anziché di EPD specifiche.	LCA dettagliata Include un elenco di 11 categorie d'inquinamento ambientale.	LCA semplificata con portata limitata dei moduli LCA e componenti edilizi. I valori predefiniti vengono calcolati con un fattore di conservatività del 25%.	LCA dettagliata Richiesta dell'impronta di carbonio, senza valori limite, che quantifica i benefici per il clima.	Il flusso degli utenti è incluso.
Banca dati & calcolo	Banca dati generica Danimarca Vari strumenti di calcolo verificati; Il Danese Build Institute fornisce uno strumento di calcolo.	Banca dati INIES Vari strumenti di calcolo verificati, incluso ELODIE sviluppato da CSTB.	Dati ambientali nazionali (NMD) Vari strumenti di calcolo verificati.	Banca dati ambientale Boverkets Vari strumenti di calcolo verificati; L'Agenzia svedese per l'ambiente fornisce uno strumento LCA.	Emissioni di gas serra dell'edilizia registrati nella banca dati CO ₂ data di Vari strumenti di calcolo verificati.	Tabella dei valori di calcolo attuali (OKOBAUDAT & ELCA).

Per quanto riguarda le dimensioni di riferimento, la maggior parte dei paesi utilizza la superficie utile calpestabile (SLP) come parametro per la normalizzazione dei risultati. Questo consente di esprimere gli impatti ambientali in modo comparabile tra edifici di diversa grandezza e tipologia, facilitando così l'analisi e il confronto tra progetti¹⁸.

18. Graaf L., Broer R., 2023, p.19.

Sul fronte dei dati, è generalmente possibile utilizzare sia dati specifici, provenienti dalle dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) e riferiti a materiali o prodotti di uno specifico produttore, sia set di dati generici, che rappresentano valori medi per categorie di prodotti. La maggior parte dei paesi di riferimento dispone di un database nazionale che contiene entrambe le tipologie di dati. In Francia e Svezia, l'uso di dati specifici è incentivato, mentre l'utilizzo di dati generici comporta un sovrapprezzo del 25%. In seguito all'introduzione delle regolamentazioni, in tutti i paesi si è registrato un aumento significativo delle EPD¹⁹.

19. *Ivi*, p.11

Per la valutazione del Whole Life Carbon (WLC), i paesi europei adottano indicatori chiave differenti per esprimere l'impatto ambientale degli edifici. In generale, questi indicatori misurano le emissioni di gas serra normalizzate rispetto alla superficie e commisurato alla durata di utilizzo dell'edificio. Nei Paesi Bassi, ad esempio, viene utilizzato un indicatore aggregato di impatto ambientale, espresso in euro per metro quadrato per anno (EUR/m²/anno), che monetizza diversi impatti ambientali, inclusi quelli legati al carbonio. In Danimarca, la normativa stabilisce un limite massimo alle emissioni totali di gas serra lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, espresso in kgCO₂ equivalente per metro quadrato per anno (kgCO₂eq/m²/anno). In Svezia, l'approccio attuale considera esclusivamente le emissioni incorporate, limitando i confini del sistema ai moduli A1-A5, mentre le emissioni operative non sono ancora incluse nell'indicatore obbligatorio. La Francia, invece, adotta un approccio più completo: le emissioni di gas serra vengono riportate come un valore unico riferito all'intera vita utile dell'edificio (50 anni), espresso in kgCO₂eq/m², con una distinzione chiara tra le emissioni operative e quelle incorporate, per garantire una valutazione bilanciata di entrambi gli aspetti²⁰.

20. *Ibidem*

Tabella 4: Confronto ulteriore indicazioni e approcci paesi europei, elaborazione personale

Paese	Indicatore chiave	Confini del sistema	Note
Paesi Bassi	Impatto ambientale aggregato (EUR/m ² /anno)	Intero ciclo di vita	Monetizza diversi impatti ambientali
Danimarca	Limite normativo alle emissioni (kgCO ₂ eq/m ² /anno)	Intero ciclo di vita	Limite massimo stabilito dalla normativa
Svezia	Emissioni di Embodied Carbon (kgCO ₂ eq/m ²)	Solo moduli A1-A5 (fasi di prodotto e costruzione)	Emissioni operative non ancora incluse
Francia	Emissioni totali ciclo di vita in 50 anni (kgCO ₂ eq/m ² /anno)	Intero ciclo di vita	Emissioni operative e incorporate riportate separatamente

Infine, la maggior parte dei paesi supporta l'introduzione delle normative relativi alle emissioni di gas serra tramite linee guida, webinar e fogli informativi al fine di facilitarne la comprensione e l'applicazione²¹.

21. Graaf L., Broer R., 2023, p.23

GRAN BRETAGNA

Adozione del *Professional Statement*, pubblicato dalla Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), che introduce la verifica dell'Embodied Carbon (EC) e stabilisce le linee guida per la contabilizzazione dello stesso, distinguendone le modalità di valutazione in base alle diverse fasi del processo progettuale, utilizzando fonti di dati differenti. Si prevede l'esecuzione di una Whole Life Carbon Assessment prima dell'inizio della progettazione esecutiva al fine di garantire una valutazione completa delle emissioni di carbonio lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

A livello nazionale, si evidenzia l'iniziativa LETI (London Energy Transformation Initiative), un network che riunisce oltre 1000 professionisti del settore delle costruzioni che dal 2017 ha reso disponibili numerosi documenti, tra cui guide pratiche che forniscono metodi e strumenti per affrontare l'emergenza climatica.

Punti chiave



Devono essere rispettate le prescrizioni sull'Energy Use Intensity (EUI), previste nel report LETI: Climate Emergency design guide, così come il totale approvvigionamento di energia rinnovabile per il funzionamento del manufatto edilizio a uso residenziale



Percentuale minima di materiali e prodotti riutilizzati nella realizzazione del manufatto edilizio a uso residenziale



Target di emissioni di carbonio nelle fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio da A1 a A5. Il calcolo include: strutture, chiusure, partizioni interne ed esterne, impianti e finiture



Percentuale minima di materiali e prodotti riutilizzati al termine della vita utile del manufatto edilizio a uso residenziale



Target di emissioni di carbonio nelle fasi del ciclo di vita del manufatto edilizio da A1 a A5. Il calcolo, oltre alle voci definite sopra, include anche le azioni di compensazione

Figura 5 Valori di soglia previsti dalla Guida LETI. Tratto da (Giordano & Andreotti, Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio., 2024) p.11

Il documento "LETI –Embodied Carbon Primer" definisce obiettivi specifici per il periodo 2020-2030, LETI stabilisce un valore soglia di 500 kgCO₂/m² di EC per edifici di nuova costruzione o oggetto di retrofit destinati al settore residenziale.

Nel caso in cui il progetto preveda un intervento di off-setting, il limite viene ulteriormente ridotto a 400 kgCO₂/m².

22. Andreotti J., Giordano R., 2024, pp.10-11

Figura 6: Scheda di approfondimento Gran Bretagna. Elaborazione personale²²

FRANCIA

Elaborazione nel 2016 della Strategia Nazionale per il Basso Carbonio (SNBC), per il settore edilizio gli obiettivi principali sono una riduzione del 49% delle emissioni entro il 2030 rispetto ai livelli del 2015 e la totale decarbonizzazione del settore entro il 2050.

Per raggiungere questi obiettivi sono state delineate quattro principali azioni:

- una ristrutturazione radicale del patrimonio edilizio esistente
- l'eliminazione della povertà energetica entro il 2028
- una ristrutturazione approfondita degli edifici pubblici
- un incremento delle prestazioni energetiche e climatiche nei nuovi edifici.

L'analisi del ciclo di vita (LCA) è promossa come strumento per valutare l'impatto ambientale, insieme a sovvenzioni per progetti innovativi, con particolare attenzione all'uso di materiali biologici e a basso impatto. Per incentivare il riciclo e il riutilizzo, è stata introdotta la "Responsabilità estesa del produttore" nel 2023, mirata ad aumentare i tassi di recupero dei materiali.

Sul piano normativo, dopo il programma pilota "Bâtiment à Énergie Positive et Réduction Carbone (E+C-)" avviato nel 2017, è stata adottata nel 2021 la legge RE2020, che stabilisce regole per ridurre le emissioni degli edifici attraverso l'uso di fonti energetiche a basse emissioni e criteri bioclimatici. L'obiettivo è ridurre del 50% le emissioni di carbonio incorporate entro il 2030 e raggiungere la decarbonizzazione totale entro il 2050.

Il monitoraggio delle emissioni di gas serra nel settore edilizio avviene tramite un database anonimo, con valori limite definiti per le emissioni incorporate e operative, mentre l'indicazione delle emissioni dell'intero ciclo di vita degli edifici rimane facoltativa e a scopo informativo.

Figura 7: Scheda di approfondimento Francia. Elaborazione personale^{23 24}

23. KyotoClub e Legambiente, 2023, p.18

24. Alliance HQE-GBC, ROADMAP - A pathway to decarbonization. 2022, p.2, p.4, p.5, p.8, pp. 11-13, pp.21-24

GERMANIA

Il settore edile ha costantemente mancato gli obiettivi annuali di riduzione delle emissioni operative, esaurendo rapidamente il budget di carbonio disponibile. Sebbene non ci siano requisiti vincolanti generali per l'analisi dei gas serra nel ciclo di vita dei nuovi edifici, dal 2023 il programma di finanziamento "Nuove costruzioni rispettose del clima" e il "Sigillo di qualità Sustainable Building" (QNG) impongono limiti specifici per le emissioni di gas serra. Il QNG stabilisce i confini di calcolo delle emissioni, includendo elementi architettonici e impiantistici, suddivide il ciclo di vita in moduli seguendo norme come la UNI EN 15804:2021. Un approccio simile è adottato dal Sigillo Federale dell'Edilizia Sostenibile (BNB) che si applica agli edifici pubblici e richiede valutazioni del ciclo di vita con criteri per lo smantellamento e il riciclaggio.

A supporto delle valutazioni si impiega il database ÖKOBAUDAT che fornisce dati generici e specifici provenienti da dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD). L'Istituto federale per la ricerca edilizia mette a disposizione il software gratuito ELCA, obbligatorio per le valutazioni nell'ambito del BNB e impiegato per promuovere pratiche sostenibili e competenze nel settore edilizio.

25. Graaf L., Broer R., 2023

Figura 8: Scheda approfondimento Germania. Elaborazione personale²⁵

1.1.3. Approcci e iniziative in Italia

Per quanto riguarda l'Italia, all'interno del progetto Building Life promosso dalla rete europea del *World Green Building Council*, la delegazione italiana sviluppa la Roadmap per il 2050 strutturando un approccio sistemico affinché l'ambiente costruito possa giungere alla neutralità climatica come previsto dagli impegni dell'Italia in quanto membro dell'Unione Europea. Si considerano le normative europee vigenti e il risultato del forum di discussione nazionale è una strategia che considera le interdipendenze dei tre pilastri indispensabili per attuare la decarbonizzazione generale:

- rinnovamento tecnologico a tutti i livelli del sistema di generazione elettrica e il cospicuo incremento della quota di fonti rinnovabili;
- un'intensa elettrificazione degli usi finali, specialmente del riscaldamento e trasporti;
- efficientamento energetico di tutti i settori;

Secondo il *Green Building Council Italia* il settore delle costruzioni si deve inserire all'interno di questo contesto caratterizzando le ristrutturazioni degli edifici esistenti e le nuove costruzioni con materiali e processi a zero impatto ambientale, impiegando fonti energetiche rinnovabili e decarbonizzate per la durata dell'intero ciclo di vita.

Italy for Climate ha elaborato i dati forniti da *ISPRA*, *Eurostat*, *ENEA* e *GSE* registrando un aumento dei consumi di energia del 9% rispetto al 1990, ma anche una riduzione di circa il 20% delle emissioni di CO₂ poiché l'energia elettrica è prodotta per il 40% da fonti rinnovabili e gas naturale²⁶.

In conformità con il *Regolamento (UE) 2018/1999 sulla governance dell'Unione dell'energia e l'azione per il clima*, l'Italia ha pubblicato nel 2018 il *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)* e, successivamente, nel 2021, la *Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra*²⁷. La prima, con una visione al 2030, stabilisce obiettivi vincolanti articolati su cinque aree prioritarie: decarbonizzazione, efficienza energetica, sicurezza dell'approvvigionamento, sviluppo del mercato interno dell'energia e promozione della ricerca, innovazione e competitività. La *Strategia a lungo termine*, invece, si proietta al 2050 e, allineandosi ai più recenti obiettivi europei di neutralità climatica, presenta un piano più ambizioso che riconsidera gli obiettivi lungo tre direttrici fondamentali:

1. una riduzione del 40% della domanda energetica, resa possibile principalmente dalla diminuzione dei consumi legati alla mobilità privata e al settore civile;

26. Green Building Council Italia. Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito. Roadmap italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050, 2022, pp.12-13.

27. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero delle Politiche agricole, Alimentari e Forestali, 2021

- una trasformazione radicale del mix energetico a favore delle fonti rinnovabili, accompagnata da una forte elettrificazione degli usi finali, pari al 50%, e dallo sviluppo della produzione di idrogeno;
- un aumento della capacità di assorbimento della CO₂ attraverso una gestione sostenibile delle superfici verdi e forestali, il ripristino delle aree degradate e nuovi interventi di rimboschimento²⁸.

I 53 obiettivi della tabella di marcia italiana sono suddivisi in tre aree d'azione prioritarie:



Decarbonizzazione degli edifici



Circolarità per il settore delle costruzioni



Qualità e resilienza delle città

Figura 6 Aree di azione della Roadmap italiana, tratto da Green Building Council Italia, 2022, p. 8

Attribuite alle sei categorie di stakeholder:

- governo e pubbliche amministrazioni centrali, regionali e locali;
- sviluppatori immobiliari;
- professionisti, consulenti e imprese di costruzione;
- produttori di materiali e componenti per l'edificio e l'impianto;
- servizi e reti di energia;
- settore finanziario privato²⁹.

Per l'area d'azione inerente alla *Decarbonizzazione degli edifici* entro il 2025 i ministeri competenti, in coordinamento con le normative europee, stabiliranno un piano nazionale di riqualificazione energetica degli edifici. Questo piano si concentrerà sia sugli edifici residenziali che su quelli non residenziali, pubblici e privati, con l'obiettivo di trasformare il patrimonio edilizio esistente in edifici a zero emissioni entro il 2050.

A livello nazionale verranno definiti e armonizzati, in conformità con i parametri europei, i metodi di calcolo per gli edifici a energia zero (Net Zero Energy Building), utilizzando indicatori come quelli del quadro europeo Level(s). Inoltre, sarà introdotto un modello di passaporto per la riqualificazione energetica degli edifici che delinea gli step progressivi necessari per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione entro il 2050³⁰.

È stato inoltre consolidato il database nazionale *ARCADIA* di *ENEA*³¹, che raccoglie i dati sulle emissioni degli edifici, così come dei materiali da costruzione, a supporto di una maggiore trasparenza e tracciabilità delle informazioni.

Entro il 2030, i gestori delle reti energetiche del teleriscaldamento e teleraffrescamento definiranno una roadmap per la completa decarbonizzazione delle loro fonti entro il 2040, mentre quelli delle reti di gas consentiranno l'integrazione di impianti di biometano, aumentando la quota di gas rinnovabili. Parallelamente, il *Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF)* svilupperà una roadmap per decarbonizzare le fonti di approvvigionamento per la produzione di energia elettrica.

In ambito edilizio, i nuovi edifici e quelli riqualificati dovranno rispettare i criteri di energia zero, riducendo dispersioni, integrando fonti rinnovabili e azzerando le emissioni³². Dal 2030, edifici pubblici e privati non residenziali dovranno raggiungere almeno la classe energetica E, mentre gli edifici residenziali dovranno farlo entro il 2033.

Decarbonizzazione e sostenibilità degli edifici e delle costruzioni

Entro il 2025, l'Italia delinea un quadro di norme a livello nazionale da istituire per certificare la qualità dei materiali riciclati da costruzione e demolizione. Ogni edificio esistente dovrà disporre di un piano specifico per la futura decostruzione che permetta di facilitare i processi di dismissione e favorisca il riuso dei materiali, riducendo così l'impatto ambientale dei cantieri e orientando verso la raccolta differenziata e il riciclo. In riferimento al 2030 saranno operative linee guida nazionali per la creazione dei passaporti dei materiali, documenti digitali che permetteranno di tracciare l'intero ciclo di vita di materiali e componenti da costruzione. Le industrie dovranno garantire il riciclo e il riuso di almeno l'80% dei rifiuti generati. Nei cantieri sopra i 5000 mq, sarà richiesto l'uso esclusivo di veicoli e macchinari a zero emissioni di carbonio. Entro il 2040, le reti di produzione di energia termica e la produzione di elettricità saranno completamente decarbonizzate. Tutti gli edifici esistenti dovranno raggiungere almeno la classe energetica C, mentre quelli nuovi

30. Unione Europea. (2024). Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024

31. ARCADIA, Banca dati italiana LCA, BDI-LCA, <https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>, visionato il 10/03/2025

32. Green Building Council Italia, 2022, pp. 8-13

o riqualificati dovranno essere a energia zero. Nello stesso anno, l'intero settore edile dovrà garantire che il 100% dei rifiuti, esclusi quelli pericolosi, sia riciclato o riutilizzato, grazie all'introduzione di materiali progettati fin dall'origine per il disassemblaggio. In parallelo, in tutti i cantieri saranno impiegati unicamente veicoli e macchinari a zero emissioni. Gli edifici privati non collegati a reti termiche decarbonizzate dovranno organizzarsi come comunità energetiche rinnovabili, garantendo un approvvigionamento da fonti pulite. Infine, entro il 2050, gli edifici sia di nuova costruzione che quelli esistenti, dovranno raggiungere l'obiettivo di azzerare completamente le emissioni di carbonio, sia nella fase d'uso che per le emissioni incorporate degli elementi costruttivi impiegati. Questo traguardo segnerà il completamento della transizione verso edifici climaticamente neutrali e progettati per massimizzare il ciclo di vita dei materiali, integrando decostruzione, riciclo e riuso all'interno di un'economia circolare pienamente operativa nel settore delle costruzioni³³.

Qualità, Resilienza Urbana e Mobilità Sostenibile

Entro il 2025 le città italiane dovranno completare la mappatura del quadro normativo esistente, identificando e risolvendo eventuali conflitti con gli obiettivi di decarbonizzazione. Questo processo porterà all'adozione di un quadro normativo aggiornato e armonizzato, strutturato per supportare e incentivare lo sviluppo delle comunità energetiche rinnovabili a livello locale. Il 2030 rappresenterà una tappa cruciale per la trasformazione delle città in quanto almeno il 70% del territorio urbano sarà dotato di infrastrutture a zero emissioni, favorendo una rete di trasporto intermodale che promuova la mobilità lenta (spostamenti in bici o a piedi), la condivisione dei mezzi di trasporto e la diffusione di trasporti pubblici a emissioni zero. Sarà definitivamente eliminato l'uso di mezzi ferroviari a gasolio. Tutti i cantieri di nuove costruzioni e ristrutturazioni sopra i 5000 mq adotteranno veicoli e macchinari a zero emissioni. Parallelamente, i complessi pubblici non serviti da reti energetiche termiche saranno riconvertiti in comunità energetiche rinnovabili.

Dal punto di vista urbanistico, i regolamenti comunali richiederanno l'integrazione di verde pensile e superfici d'acqua nelle nuove costruzioni e negli interventi di demolizione/ricostruzione, per contrastare il fenomeno dell'isola di calore urbana. Inoltre, gli edifici dismessi non riutilizzati da oltre dieci anni saranno riconvertiti in parchi o boschi urbani, con un obbligo di piantumazione di alberi ad alto fusto ogni 1000 mq. Nel 2040: tutte le aree urbane dovranno essere interamente coperte da infrastrutture a zero emissioni e il trasporto individuale sarà gradualmente sostituito

da soluzioni di mobilità lenta e sostenibile. Sarà consentito l'uso di veicoli privati a zero emissioni, ma il traffico veicolare verrà ridotto al minimo indispensabile. L'obiettivo finale, da raggiungere entro il 2050, è trasformare le città italiane in comunità a impatto ambientale minimo, progettate per resistere agli effetti più estremi dei cambiamenti climatici. Gli spazi urbani saranno caratterizzati da una maggiore biodiversità, grazie all'integrazione di superfici verdi, sistemi idrici naturali e infrastrutture progettate per minimizzare i danni ambientali e garantire la sostenibilità a lungo termine. La mobilità collettiva sarà completamente decarbonizzata, segnando il superamento definitivo dei mezzi a combustibili fossili³⁴.

Supporto alla Transizione Ecologica

A sostegno di questa grande trasformazione, il Governo ha già destinato una parte significativa dei fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) alla transizione ecologica. L'obiettivo è quello di rendere l'Italia un Paese più sostenibile e inclusivo, promuovendo al contempo un'economia sempre più competitiva, dinamica e innovativa. Tutti gli attori della filiera edilizia saranno coinvolti in questo processo. Verranno attivati percorsi formativi specifici per diffondere conoscenze e consapevolezza, indispensabili per sostenere il cambiamento. Inoltre, un tavolo tecnico nazionale faciliterà il dialogo tra i produttori di materiali e componenti, favorendo l'innovazione e l'adeguamento delle produzioni verso l'obiettivo finale: l'azzeramento delle emissioni incorporate nei materiali da costruzione³⁵.

33. Green Building Council Italia, 2022, pp. 28-31, pp. 38-40, pp. 48-51

34. Green Building Council Italia, 2022, pp. 28-31, pp. 38-40, pp. 48-51

35. Ibidem

LINEA DEL TEMPO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA

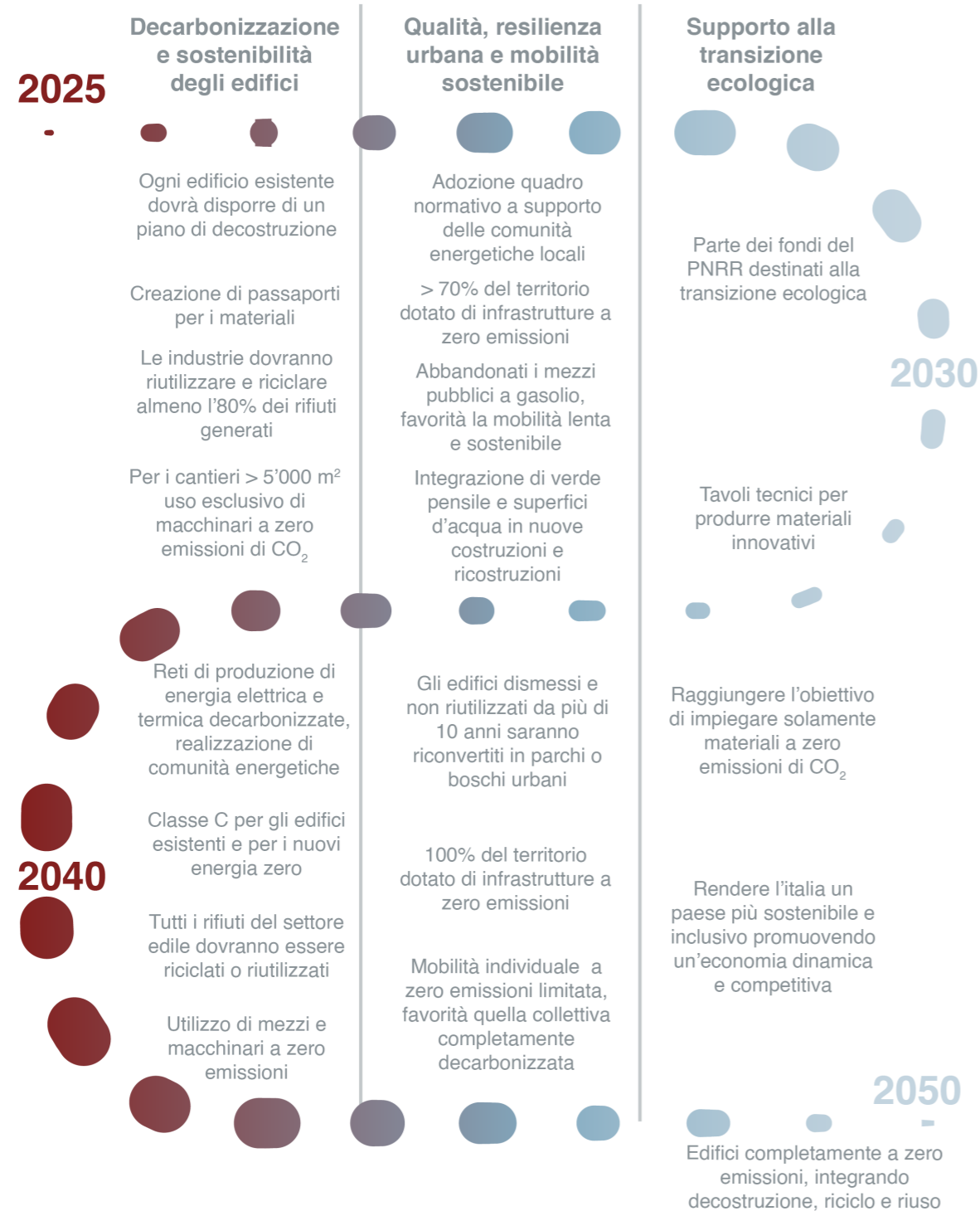


Figura 9: Linea del tempo obiettivi Roadmap italiana per la decarbonizzazione. Elaborazione personale.

2. WLC vision di un manufatto edilizio destinato ad uffici e produttivo

La valutazione di un manufatto edilizio si concentra sull'analisi delle emissioni generate durante il suo ciclo di vita e oltre, considerando anche eventuali benefici. Questa valutazione si basa su normative internazionali come la UNI EN ISO 14040:2021 e la UNI EN ISO 14044:2021 che regolano la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA).

Un altro aspetto fondamentale affrontato in questo capitolo è la Circular Economy che promuove il riuso, il riciclo e il recupero di materiali ed energia, contrastando il modello lineare di utilizzo delle risorse. Questa strategia include pratiche come il disassemblaggio selettivo per ottenere materie prime seconde e considera gli impatti ambientali che si estendono oltre la vita utile dell'edificio, come il surplus energetico prodotto e le emissioni legate a processi di esportazione dell'energia rinnovabile.

Infine si analizzano le attività di decarbonizzazione finalizzata a ridurre le emissioni di CO₂ attraverso azioni di compensazione e tecnologie innovative, in linea con gli obiettivi climatici internazionali. Per raggiungere tali traguardi è essenziale introdurre strategie mirate come l'utilizzo di materiali a basse emissioni.

Per valutazione di un manufatto edilizio si intende lo studio delle emissioni prodotte dall'edificio sia nell'arco della sua vita utile che oltre il termine. Nel corso del suo ciclo di vita, infatti, l'edificio produce emissioni durante la fase di produzione dei materiali da costruzione, la fase di cantierizzazione e costruzione, la fase di uso ovvero il periodo di fruizione dell'edificio e infine la fase di fine vita che va dalla demolizione allo smaltimento finale. Inoltre, può essere considerata una fase ulteriore, che va aldilà del ciclo di vita del manufatto, e che tiene conto di tutti gli impatti e i benefici generati successivamente alla fine della sua vita utile³⁶.

Il sistema di valutazione preso in esame si configura attraverso due distinti ambiti di analisi, definiti dai confini operativi stabiliti dalla norma UNI EN 15978. Il primo di essi si delinea nel concetto di Whole Life Carbon (WLC) (si veda la definizione riportata in Glossario), che calcola l'insieme delle emissioni di anidride carbonica associate all'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla fase di approvvigionamento delle risorse fino alla gestione della sua dismissione. Tale ambito comprende, secondo la suddivisione normativa, le fasi A, B e C, così articolate:

- la fase A comprende i processi di produzione e costruzione, includendo

36. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.23

l'estrazione delle materie prime, la fabbricazione dei materiali da costruzione e le attività di cantiere;

- la fase B copre il periodo di utilizzo dell'edificio, comprendendo interventi di manutenzione, riparazioni e il consumo energetico durante la vita utile;
- la fase C si riferisce al fine vita dell'edificio, considerando la demolizione, il trasporto e il trattamento dei materiali risultanti³⁷. Oltre la WLC, si trova la Circular Economy che comprende la fase di riuso, riciclo, termovalorizzazione e il surplus energetico, si intende il recupero di materiali ed energia prodotta andando al di là dello schema legato all'uso delle risorse secondo un'economia lineare. Questo ambito corrisponde alla fase D, definita sempre all'interno della medesima norma. Nel calcolo sono da considerare sia i potenziali benefici che gli oneri ambientali necessari per riutilizzo i materiali, dai processi di riciclo, dal recupero energetico e dalla valorizzazione delle risorse oltre la chiusura del ciclo di vita convenzionale dell'edificio³⁸. Ad oggi la pubblicazione "Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio" del 2024, sviluppato nell'ambito del progetto #BuildingLife coordinato da Green Building Council Italia rappresenta la principale guida per la metodologia di contabilizzazione degli indicatori Embodied e Operational Carbon e per la valutazione della Whole Life Carbon di un edificio, offre informazioni utili per l'applicazione di alcuni requisiti previsti dalla Direttiva UE 2024/1275 – EPBD IV, con particolare riferimento al calcolo del Potenziale di Riscaldamento Globale durante l'intero ciclo di vita del manufatto edilizio^{39 40}.

37. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.23

38. Ivi, p.20

39. Ivi, p.2

40. Parlamento Europeo, 2024, pp.1-2

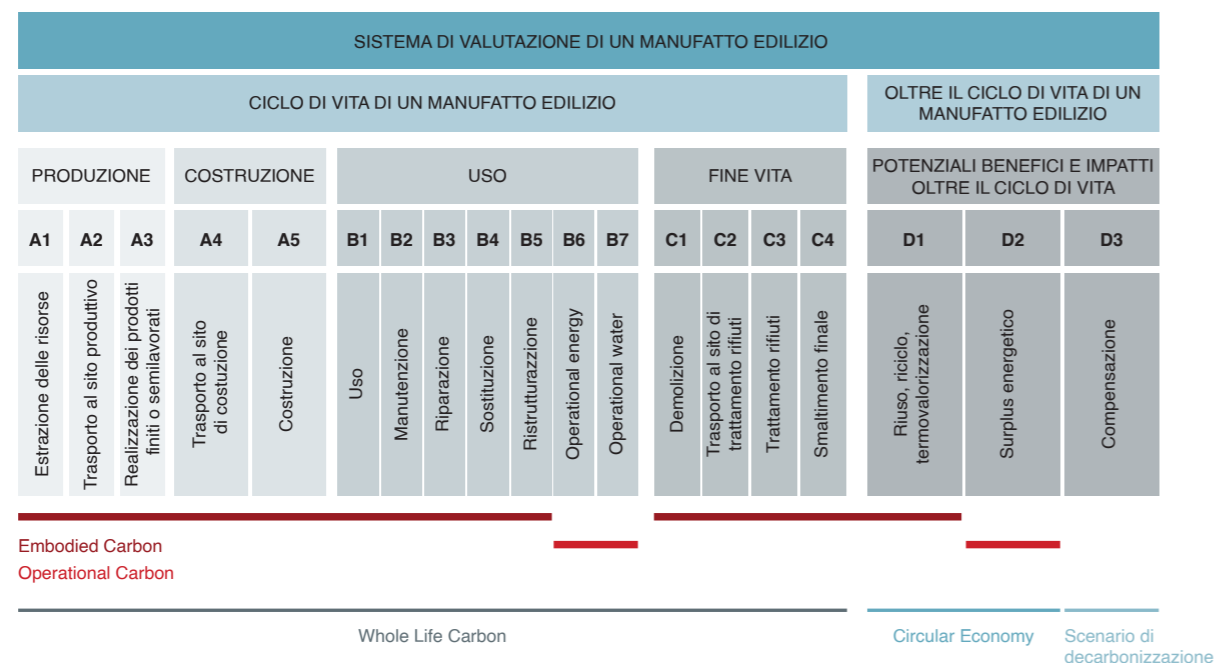


Figura 10: Schematizzazione del sistema di valutazione di un manufatto edilizio (a cura di Andreotti,

J., Giordano, R., 2024. Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC); elaborazione personale)

Infine, lo scenario di decarbonizzazione prevede di ricorrere alla compensazione delle emissioni residue per conseguire l'obiettivo di un saldo netto pari a zero di CO₂. Questa misura deve essere considerata come l'ultima opzione da adottare solo quando sono terminate tutte le alternative per la riduzione diretta delle emissioni. In linea con i principi delineati da Andrews (2014), le strategie di mitigazione devono seguire una gerarchia di priorità d'azione, nell'ordine: Avoid (evitare le emissioni), Reduce (ridurre le emissioni esistenti), Replace (sostituire processi o materiali ad alta intensità carbonica con soluzioni a minore impatto) e, solo in ultima istanza, Offsets (compensare le emissioni residue attraverso interventi esterni)⁴¹.

2.1. Whole Life Carbon assessment

La pubblicazione di Andreotti e Giordano (2024) struttura una metodologia riferendosi alle normative internazionali, in particolare le norme del gruppo ISO 14000 e del gruppo ISO 15000, le quali sono state integrate da documenti tecnici, internazionali e nazionali⁴³. Nell'analisi WLC si ha un approccio cradle-to-grave per la somma finale delle emissioni e cattura di CO₂eq⁴³, a tal fine è opportuno identificare e scegliere quali fasi del ciclo di vita considerare in relazione al manufatto oggetto di studio, i database impiegati e lo scenario temporale da impiegare nei calcoli. La metodologia suggerisce un "ambito minimo di applicazione" che prevede la valutazione delle fasi A1-A5 per l'EC e della fase B6 per l'OC⁴⁴.

41. Andrews, J, Greenhouse Gas Emissions Inventory Reports: FY 14 Briefing. The Sustainability Institute 66., 2014. <https://scholars.unh.edu/sustainability/66/> visionato il 03/06/2025

42. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.14

43. Ivi, p. 208

44. Ivi, p.45

2.2. Circular Economy dei rifiuti da costruzione e demolizione

Le attività di costruzione su larga scala in vari Paesi dell'Unione Europea negli ultimi decenni hanno generato enormi quantità di rifiuti da costruzione e demolizione (CDW). Secondo le statistiche della Commissione Europea, nel 2008 sono stati prodotti circa 890 milioni di tonnellate di questi rifiuti e attualmente solo il 50% viene effettivamente riciclato⁴⁵.

Nell'Unione Europea i rifiuti generati da costruzione e demolizione (CDW) costituiscono il più grande flusso di prodotti di scarto da gestire, attualmente si è lontani dal raggiungere l'obiettivo di riciclaggio fissato dalla Direttiva quadro sui rifiuti, che stabiliva che entro il 2020 il 70% dei rifiuti CDW nell'UE dovesse essere riciclato⁴⁶. Nel panorama italiano, più del 90% dei rifiuti viene riciclato, relegando lo smaltimento ad un ruolo marginale⁴⁷.

45. Villoria Saez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio González, A. & Porras-Amores, C., Best Practices measures for construction and demolition waste management in building construction, 2013, p. 52

46. Ibidem

47. Agora Energy Transition, REDUCING EMBODIED CARBON IN NEW BUILDINGS: RE2020 IN FRANCE, 2022, pp.1-3

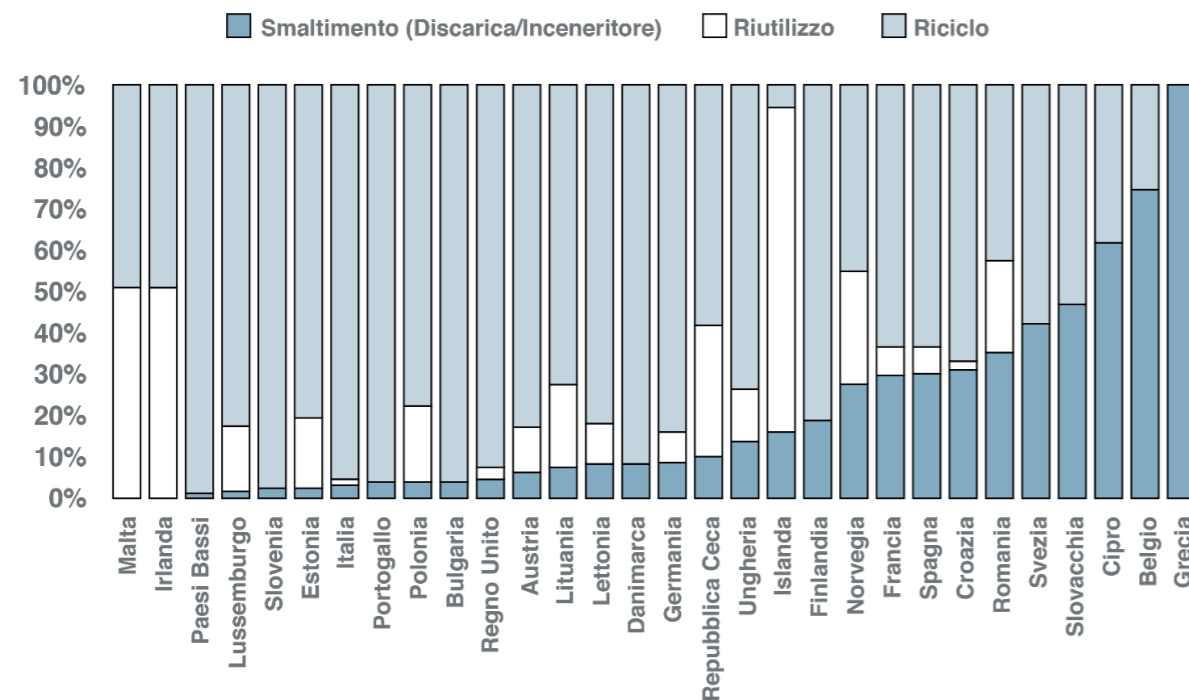


Figura 11: *Trattamento della frazione minerale dei rifiuti da costruzione e demolizione nel 2014 (Eurostat, 2017). Da Styles, Schoenberger, Zeschmar-Lahl, Gálvez-, & Gálvez-Martos, 2018 p.168*

L'obiettivo perseguito dalla Circular Economy (CE) (*definizione in glossario*) è quello di preservare gli edifici attraverso la manutenzione, il restauro e le ristrutturazioni, considerando la decostruzione solo come ultima opzione qualora non si riescano a garantire adeguate condizioni strutturali e sanitarie del fabbricato. Per questo, tra le best practices sono presenti processi selettivi di smantellamento che permettono di rimuovere accuratamente gli elementi in modo da ottenere materie prime seconde da reimpiegare nel processo produttivo⁴⁸.

48. Tirado R., Aublet A., Laurenceau S., Sustainability. Challenges and Opportunities for Circular Economy Promotion in the Building Sector, 2022, pp.113-115

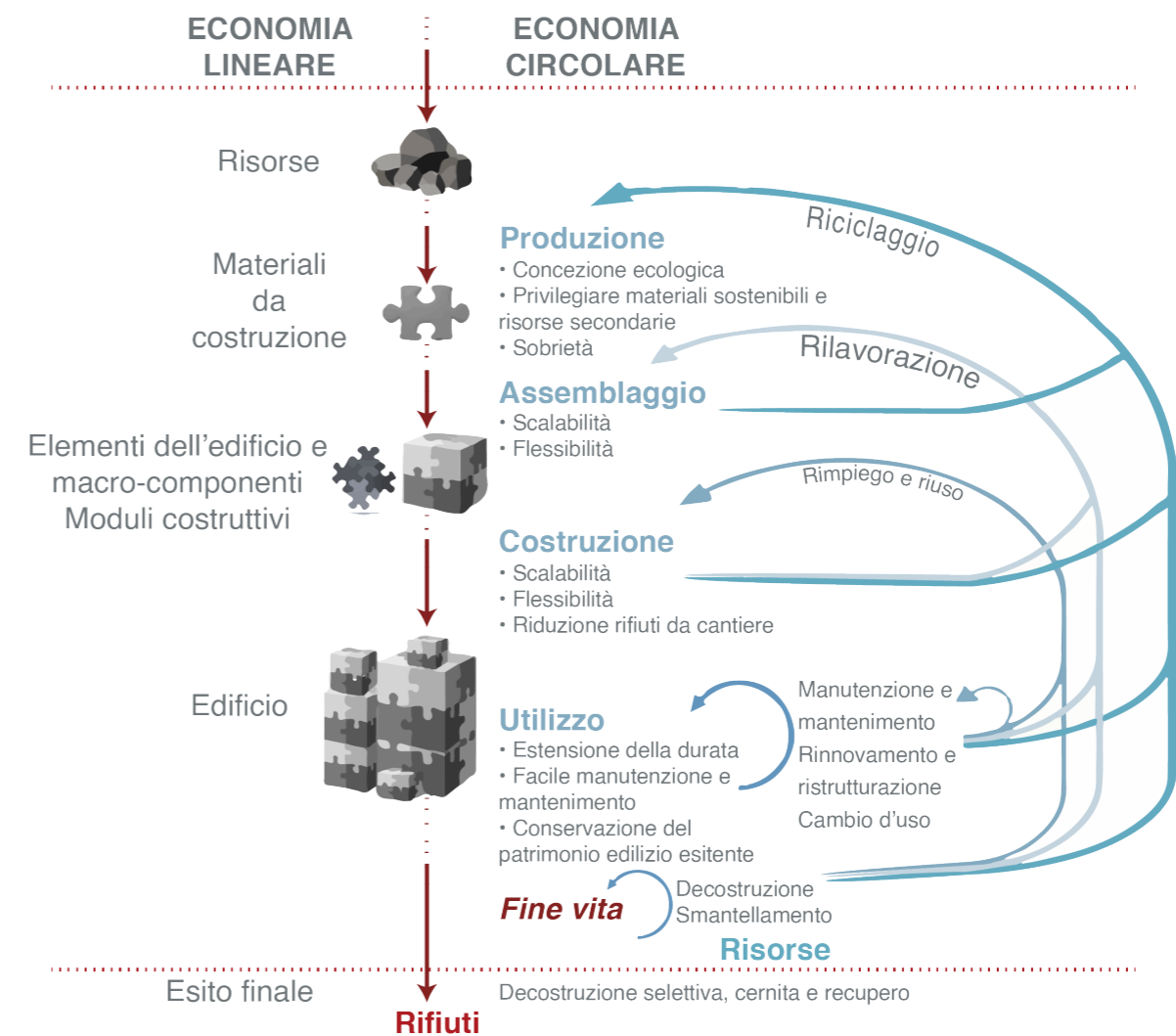


Figura 12: *Livelli di valutazione delle risorse per il settore delle costruzioni. Rielaborazione da Tirado, Aublet, & Laurence, 2022 p.115*

Dal punto di vista della metodologia di valutazione, considerando gli standard UNI EN 15978:2011 e UNI EN 15643:2021, la fase D legata al riuso e recupero può essere inclusa nel calcolo stimando i benefici e gli impatti ambientali dell'edificio oltre alla durata del ciclo di vita utile stabilito per la tipologia di manufatto.

Relativamente ad operazioni di riciclo, riuso, recupero a cui si possono sottoporre i prodotti e sul trasferimento del surplus energetico prodotto in fase d'uso (B6), la valutazione di questa fase avviene separatamente dalle altre poiché è influenzata da tecnologie di recupero e riciclaggio che in futuro potranno essere ulteriormente sviluppate e migliorate⁴⁹. Per questo, è necessario capire e risolvere eventuali problemi tecnici e burocratici, così da poter gestire in modo efficace i rifiuti da costruzione e demolizione già presenti durante lo studio⁵⁰. A fronte di questo si valutano potenziali scenari di circolarità dei materiali e prodotti considerati nel progetto e in fase di realizzazione degli stessi, includendo le emissioni di CO₂ legate all'esportazione di energia

49. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.26

50. Vazquez-Lopez E., Garzia F., Perneti R., Solis-Guzman J., Marrero M., Assessment Model of End-of-Life Costs and Waste Quantification in Selective Demolitions: Sustainability, 2020, p.178

rinnovabile prodotta in eccesso da impianti a servizio dell'edificio⁵¹.

2.3. Scenario di decarbonizzazione

L'ultima fase della valutazione tiene conto degli scenari di decarbonizzazione (modulo D3 Compensazione) (vedi Glossario). Infatti, per raggiungere emissioni nette pari a zero è necessario adottare azioni di compensazione, che permettano di compensare le emissioni di CO₂eq prodotte per la costruzione e la fruizione del manufatto edilizio. Al fine di contrastare la crisi climatica e contenere le emissioni di carbonio esiste già la possibilità di implementare misure e tecnologie in grado di soddisfare la domanda energetica globale, pur mantenendo le concentrazioni atmosferiche di CO₂ entro limiti pari al raddoppio rispetto ai livelli preindustriali. Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ciò consentirebbe di perseguire una traiettoria di sviluppo sostenibile per almeno il prossimo secolo. Il raggiungimento del livello di riduzione delle emissioni necessario per stabilizzare il clima dipende anche dalla capacità futura degli oceani e della biosfera di assorbire la CO₂ che devono essere preservati allontanandosi sempre più dal livello di emissioni atteso senza interventi Business-as-usual (BAU) in cui le emissioni di carbonio continuano a crescere dell'1,5% annuo, come negli ultimi trent'anni⁵². In questo contesto, la Figura 11 Azioni per decarbonizzare il settore delle costruzioni. Rielaborazione da ANCE, p.40 riporta alcune soluzioni attuabili, il cui approfondimento sarà contenuto nel capitolo 4.2.1 Soluzioni di compensazione e decarbonizzazione applicabili al caso di studio dove verranno relazionati all'edificio analizzato.

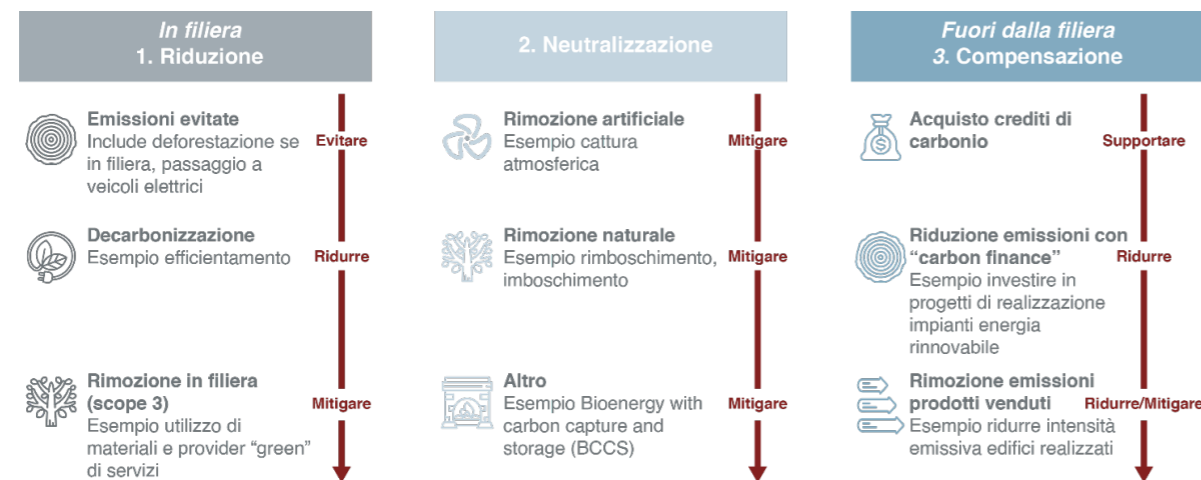


Figura 13: Azioni per decarbonizzare il settore delle costruzioni. Rielaborazione da ANCE, p.40

2.4. Embodied Carbon (EC)

Il World Green Building Council (WGBC) e la Global Alliance for Building and Construction (GlobalABC) hanno fissato il target di riduzione dell'Embodied Carbon del 40% rispetto ai valori odierni entro il 2030 per tutti gli edifici. Ciò aumenta la percentuale al 50% per gli edifici best practice. Questo è solo un obiettivo transitorio che porterà a zero il bilancio di emissioni entro il 2050⁵³.

Tradizionalmente, gli sforzi per combattere il cambiamento climatico si sono concentrati sulla riduzione delle emissioni di carbonio derivanti dal consumo energetico operativo degli edifici. Tuttavia, con l'aumento dell'efficienza energetica degli edifici e la decarbonizzazione della produzione di elettricità, le emissioni operative dei nuovi edifici sono destinate a diminuire in modo significativo. Questo cambiamento implica che l'Embodied Carbon diventerà una componente sempre più rilevante delle emissioni totali.

Nei nuovi edifici a basse emissioni, infatti, l'EC potrà rappresentare una percentuale significativa delle emissioni totali, arrivando a costituire tra il 40% e il 70% delle emissioni di carbonio lungo l'intero ciclo di vita⁵⁴. Di conseguenza, la gestione delle emissioni dell'EC è destinata a diventare una priorità fondamentale per ridurre l'impatto ambientale complessivo degli edifici nel futuro.

La prima sfida consiste nel migliorare la comprensione del settore, focalizzandosi sugli elementi che hanno l'impatto maggiore all'interno di un progetto edilizio. Altri ostacoli da affrontare includono la carenza di dati disponibili provenienti da casi di studio, oltre a una scarsa disponibilità di informazioni e trasparenza nel processo.

Per ridurre le emissioni è necessario approcciarsi al progetto incentivando la ristrutturazione e il riutilizzo per ridurre le nuove costruzioni, tenendo in considerazione la struttura dell'edificio, costruendo in base al contesto locale per integrare al meglio l'edificio e garantirne la longevità, scegliere materiali a basse emissioni di carbonio, valutare il fine vita e l'adattabilità, coordinando i team che lavorano al progetto con l'obiettivo di ottimizzare le soluzioni.

Inoltre, è possibile focalizzarsi sui vari componenti dell'edificio per poter mettere in atto strategie più mirate⁵⁵.

Infatti, come si evince dalla Figura 13 Percentuale di EC in base ai componenti dell'edificio (a cura di Giordano R., Andreotti J., strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024; elaborazione personale), la struttura portante dei piani superiori e le fondazioni dell'edificio hanno le emissioni di EC maggiori; mentre

ciò che concerne le finiture interne occupa un ruolo più marginale.

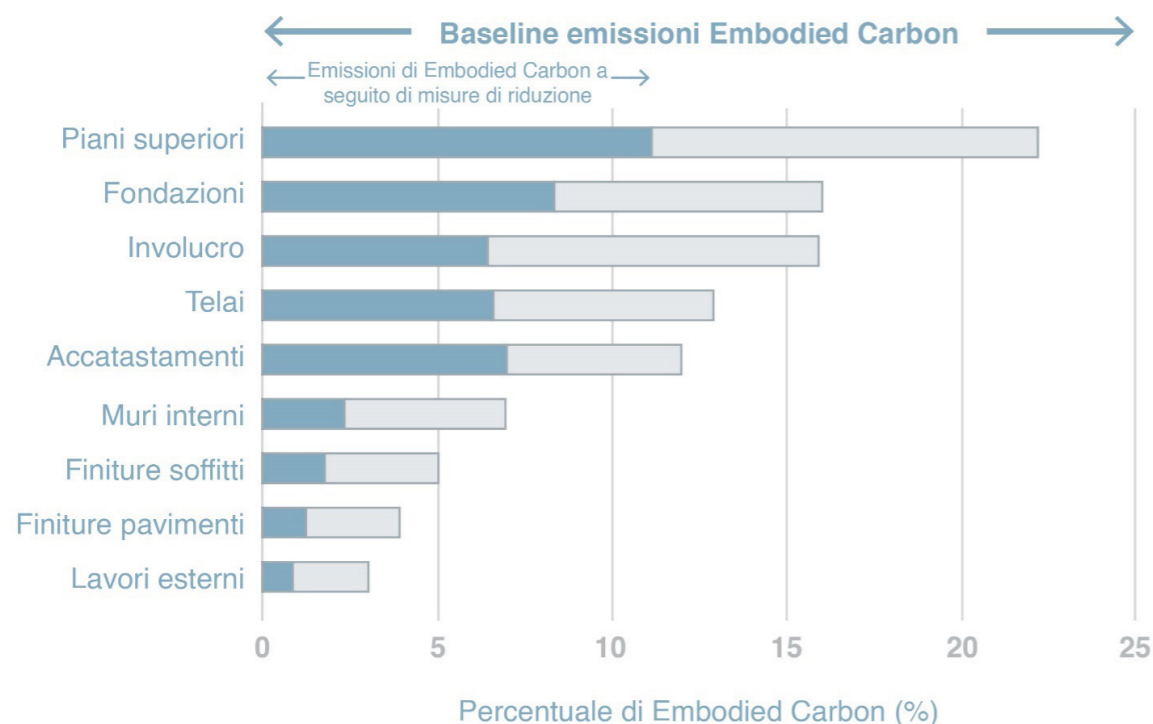


Figura 14: Percentuale di EC in base ai componenti dell'edificio. Rielaborazione personale da LETI, Climate Emergency Design Guide., 2020

Le emissioni legate all'EC possono essere classificate in tre categorie:

- Scope 1: emissioni controllate direttamente dall'impresa che produce i materiali o nella gestione delle attività di costruzione come, per esempio, i processi di produzione interna.
- Scope 2: emissioni indirette legate all'uso dell'energia acquistata per i processi produttivi
- Scope 3: emissioni indirette connesse alla fornitura, come per esempio l'estrazione dei materiali oppure le lavorazioni che avvengono a carico di aziende di terze parti

Dal punto di vista di un manufatto edilizio, vi è un'ambiguità poiché le emissioni di Scope 2 e 3 non sono facilmente distinguibili. Infatti, la produzione dei materiali da costruzione dovrebbe rientrare all'interno delle emissioni di tipo Scope 3, mentre le emissioni legate alla costruzione sono di tipo Scope 2. Però, nel caso alcune lavorazioni siano appaltate a soggetti terzi, le emissioni sarebbero di tipo Scope 3⁵⁶.

2.5. Operational Carbon (OC)

Il World Green Building Council (WGBC) e la Global Alliance for Building and Construction (GlobalABC) hanno fissato l'obiettivo a zero emissioni di Operational

Carbon (definizione in Glossario) entro il 2030 per tutti gli edifici di nuova costruzione⁵⁷. Il vantaggio del OC è che può essere sensibilmente ridotto anno dopo anno grazie all'adozione di strategie in grado di diminuirne le emissioni. Per fare ciò, le emissioni legate all'EC aumenteranno poiché bisognerà adattare gli edifici esistenti ai nuovi target. Proprio per questo motivo, il focus per la riduzione degli impatti dell'edificio si sta progressivamente spostando verso lo studio delle fasi d'uso⁵⁸.

La problematica principale è data dal gap tra le previsioni in fase di progetto e il consumo effettivo in fase di uso. Questo scarto può variare dal 40% fino al 500% rendendo estremamente rilevante questa problematica. Un altro fattore da tenere in considerazione è il divario tra la progettazione e la realizzazione dell'edificio⁵⁹. La strategia per risolvere per questo problema si trova a metà un approccio "top-down" che si concentra su ciò che è possibile realizzare; e uno "bottom-up" che adotta una prospettiva più ampia, considerando ciò che è probabile che accada al di fuori dei confini dell'edificio.

Per la prima strategia di azione si punta a stabilire dei budget energetici calibrati in base alla tipologia di edificio sulla base di previsioni al 2030 e al 2050 per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Dividendo proporzionalmente il totale ricavato si può stimare la quota parte di energia relativa alla specifica tipologia.

Per quanto riguarda la seconda strategia, parte dallo studio di riduzione della domanda energetica di standard di edifici con funzioni differenti estrapolando i principali metodi di ottimizzazione, confrontando così il prima e il dopo della domanda energetica del manufatto edilizio. Dunque, la combinazione dei due metodi risulta essenziale per ottenere una visione quanto più realistica del panorama futuro in modo da ottenere uno scenario che sia il più chiaro e accurato possibile, riducendo sempre di più lo scarto che persiste tra la progettazione e la realizzazione⁶⁰.

57. United Nations Environment Programme, 2024, p.60

58. Andreotti J. Giordano R., 2024, p.7

59. LETI, 2020, p.41

60. Ivi, p.42

56. Giordano R., Andreotti J., 2024, p.16

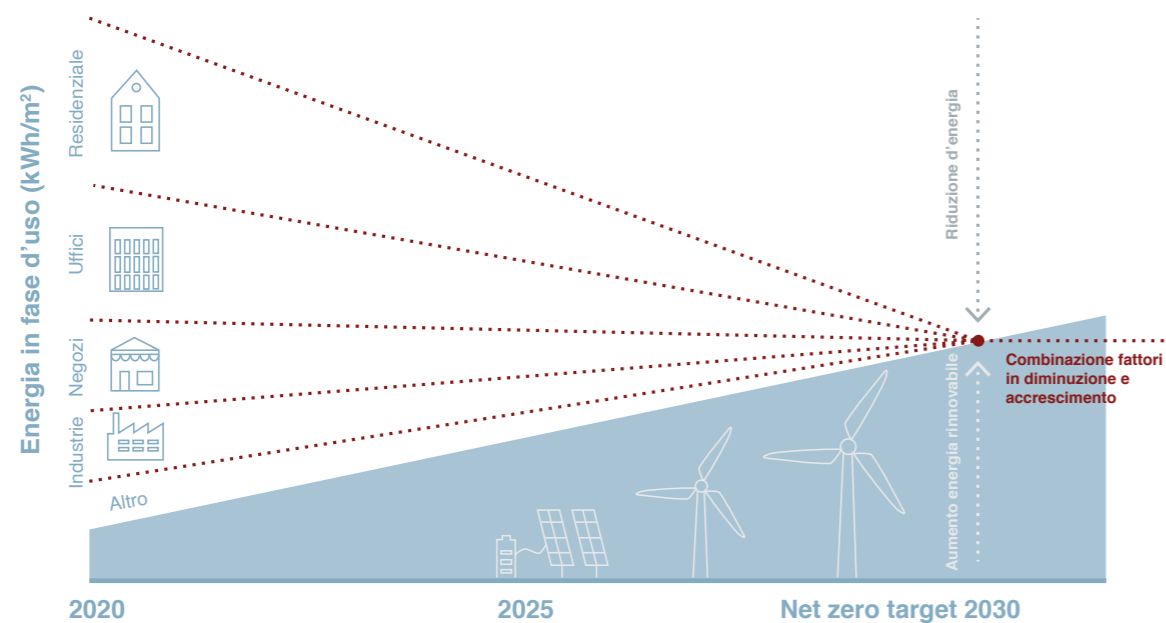


Figura 15: Illustrazione della strategia “top-down” e “bottom-up”. Rielaborazione personale da LETI, Climate Emergency Design Guide, 2020

In base alle tecnologie presenti attualmente e alle previsioni di sviluppo applicabili al patrimonio edilizio esistente o ad edifici di nuova costruzione, è possibile stabilire delle “best strategies” più o meno significative in base alle tipologie di edificio. Ove è possibile, è necessario tenere conto che l’orientamento, la forma e la percentuale di superficie vetrata sono accorgimenti utili per un’ulteriore diminuzione della domanda energetica⁶¹.

61. LETI, 2020, p.41

Le emissioni legate all’OC possono essere classificate in tre categorie:

- Scope 1: emissioni direttamente generate da sistemi di combustione all’interno dell’edificio come, per esempio, caldaie o impianti di cogenerazione
- Scope 2: emissioni indirette che riguardano il consumo di energia acquistata come quella elettrica
- Scope 3: emissioni indirette legate al funzionamento e all’uso dell’edificio come, per esempio, gli spostamenti in entrata e in uscita di dipendenti e addetti alla manutenzione⁶².

62. Giordano R., Andreotti J., 2024, p.16

3. Pattern Headquarter HQ

In questo capitolo viene presentato l'edificio preso come caso studio. Pattern Head Quarter è un sito produttivo per lavorazioni e stoccaggio di tessuti nel quale è presente anche una sezione uffici. La descrizione del manufatto avviene attraverso un focus sulla committenza e sui vari attori coinvolti, per poi inquadrare l'edificio nel suo contesto e presentare gli obiettivi del progetto anche in relazione al raggiungimento della certificazione LEED Gold, scopo primario per la committenza. Infine viene presentato il progetto dal punto di vista architettonico, in correlazione con i disegni di progetto, e dal punto di vista impiantistico.

3.1. Principali attori coinvolti

3.1.1. Committente: PATTERN S.p.A.

Pattern è stata fondata nel 2000 da Franco Martorella e Fulvio Botto come azienda leader nella prototipazione e ingegnerizzazione di abbigliamento maschile e capispalla di lusso. Nel 2017 ha avuto inizio un processo di crescita strutturato che, nel 2019, ha condotto alla formazione del Gruppo Pattern, composto da 13 stabilimenti distribuiti in sette regioni italiane, ciascuno dei quali è un punto di riferimento nella prototipazione e produzione di diverse categorie di prodotto. Il gruppo copre l'intero ciclo produttivo, dalla ricerca e ingegnerizzazione fino alla produzione rispettando i tre valori fondamentali che ne definiscono l'identità: *ESG (Environment, Social, Governance)*, Human Knowledge, Tecnologia & Innovazione. Dal punto di vista della sostenibilità a livello aziendale, dal 2021 Pattern è ufficialmente inserito come partecipante del *United Nations Global Compact*, una rete globale di più di 13.000 aziende e 3.000 partecipanti non-business che condivide l'impegno verso un futuro sostenibile adottando modelli di impresa responsabili. Inoltre, Con *CO₂alizione Italia* per la neutralità climatica, insieme ad altre 60 imprese italiane, si impegna formalmente nella sfida dell'Unione Europea per limitare il riscaldamento globale e raggiungere la neutralità climatica, perseguendo l'idea di un'economia a zero emissioni di gas climalteranti entro il 2050 perseguendo gli obiettivi descritti in tabella 5.

Tabella 5: Obiettivi di riduzione delle emissioni (a cura di Pattern Spa); rielaborazione personale

Emissioni GHG per gli obiettivi SBTi	Metodi applicati per gli obiettivi SBTi	Obiettivi SBTi
Scope 1 e 2	Scope 1 - Riduzione assoluta	42% di riduzione entro 2030 dalla misurazione del 2022

Emissioni GHG per gli obiettivi SBTi	Metodi applicati per gli obiettivi SBTi	Obiettivi SBTi
	Scope 2 - Requisiti per l'approvvigionamento di energia rinnovabile	100% di elettricità acquistata da fonti rinnovabili entro il 2027
Scope 3	Scope 3 - Riduzione assoluta	42% di riduzione entro 2030 dalla misurazione del 2022

Nel 2022, il Gruppo Pattern ha, inoltre, condotto un'analisi dell'Impronta di Carbonio per tutte le società del Gruppo, quantificando le emissioni di gas a effetto serra dirette e indirette connesse alle attività aziendali al fine di identificare le possibili misure per la loro mitigazione e riduzione. L'analisi e la rendicontazione delle emissioni di gas a effetto serra sono state effettuate in conformità al GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard⁶³.

3.1.2. Gruppo di progettazione: SMAPROGETTI

SMAPROGETTI è uno studio associato torinese in cui ingegneri, architetti, urbanisti e paesaggisti collaborano per la realizzazione di progetti a scala architettonica e urbana sviluppando analisi di fattibilità, riqualificazione e valorizzazione di aree e piani territoriali.

Nato nel maggio del 2000, lo studio di progettazione assume la sua forma attuale nel 2021 con la denominazione di SMAPROGETTI. Lo studio è attivo in campi differenti, tra cui residenziale, commerciale, produttivo, ricettivo, terziario, turistico e dei servizi pubblici sia a favore di enti pubblici che privati⁶⁴.

Per il quartier generale di Pattern S.p.A., lo studio si è occupato della progettazione, della stesura del permesso di costruire e della direzione dell'esecutivo architettonico⁶⁵.

3.1.3. Gruppo di progettazione: EQ Ingegneria

EQ Ingegneria è una società di ingegneria con sede a Torino e Busca, specializzata in progettazione e consulenza tecnica per vari settori industriali e civili. Lo studio offre servizi nel campo della progettazione di impianti di riscaldamento e climatizzazione, recupero energetico dei processi industriali, cogenerazione e trigenerazione, teleriscaldamento, energie rinnovabili, edilizia a basso consumo energetico e risparmio idrico ponendo attenzione sulla sostenibilità dei prodotti e delle soluzioni proposti⁶⁶. Infatti, lo studio ha elaborato il progetto impiantistico ed energetico per l'edificio preso in esame.

63. Pattern Spa, Chi siamo, <https://www.patterngroup.it/it/pattern>, visionato il 14/12/2024

64. SMAPROGETTI, Home, <https://www.smaprogetti.it/>, visionato il 14/12/2024

65. SMAPROGETTI, Headquarters PATTERN S.P.A. - Collegno (TO), <https://www.smaprogetti.it/blog/portfolio/headquarters-pattern-s-p-a-collegno-to>, visionato il 14/12/2024/

66. EQ Ingegneria, Home, <http://www.eqingegneria.it/>, visionato il 14/12/2024

3.1.4. Appaltatore: Tekinda s.r.l.

Lo studio, composto da un team di ingegneri e architetti, nasce nel 1975 e si occupa di coordinare vari aspetti del progetto. Infatti, offre servizi di progettazione preliminare, modellazione architettonica e strutturale, direzione lavori, sicurezza in cantiera, prevenzione incendi e project management⁶⁷.

Nello specifico del caso studio in esame, Tekinda s.r.l. è stato responsabile per la sicurezza e ha coordinato il gruppo di lavoro.

3.1.5. Consulenza: GET Consulting

GET Consulting è una società di consulenza fondata nel 2018 che, unendo professionisti che operano nei campi della fisica e della tecnologia delle costruzioni, si pone al servizio di investitori, progettisti, appaltatori, produttori e aziende, per offrire prestazioni legate alla sostenibilità e al benessere dell'edificio. Infatti, alcuni dei servizi che offre lo studio riguardano la definizione di strategie per l'ottimizzazione energetica e la qualità interna degli edifici, la consulenza per il raggiungimento delle certificazioni LEED/WELL/BREEAM/LFA, LCA (Life Cycle Assessment) di prodotti, processi ed edifici, la valutazione di impronta di carbonio e l'affiancamento nella scelta di materiali sostenibili per il progetto⁶⁸.

Perciò, allo studio è stato affidato l'iter l'ottenimento della certificazione LEED Gold, obiettivo della committenza.

3.2. Presentazione progetto

Il caso studio è lo stabilimento del futuro quartier generale di Pattern, azienda italiana che si occupa di lavorazioni tessile per il settore della moda. L'edificio di nuova costruzione occuperà un lotto di terreno di circa 21600 m² situato in via Italia 5 sul territorio del Comune di Collegno, all'interno dell'area della Città Metropolitana di Torino e avrà due destinazioni d'uso. Infatti, al piano terra, costruito con una struttura prefabbricata in calcestruzzo armato, ci sarà lo spazio dedicato alle lavorazioni tessili e allo stoccaggio dei prodotti; mentre nei due piani superiori, costruiti con una struttura in travi di acciaio, sono presenti gli uffici della direzione. L'area totale del lotto comprende una superficie a verde non irrigato, 1250 m² di superficie verde irrigata, 4260 m² di copertura dell'edificio, percorsi pedonali, carrai e superficie a parcheggio per favorire la fruizione dell'area. La gross floor area (GFA) dell'edificio complessiva di tutti i livelli è di 5200 m². L'intero progetto ha l'obiettivo di raggiungere la certificazione LEED di livello Gold⁶⁹.

67. Tekinda s.r.l., Home, <https://www.tekinda.it/>, visionato il 14/12/2024

68. GET Consulting, About us, <https://get-consulting.it/>, visionato il 14/12/2024

69. GET Consulting s.r.l., Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023

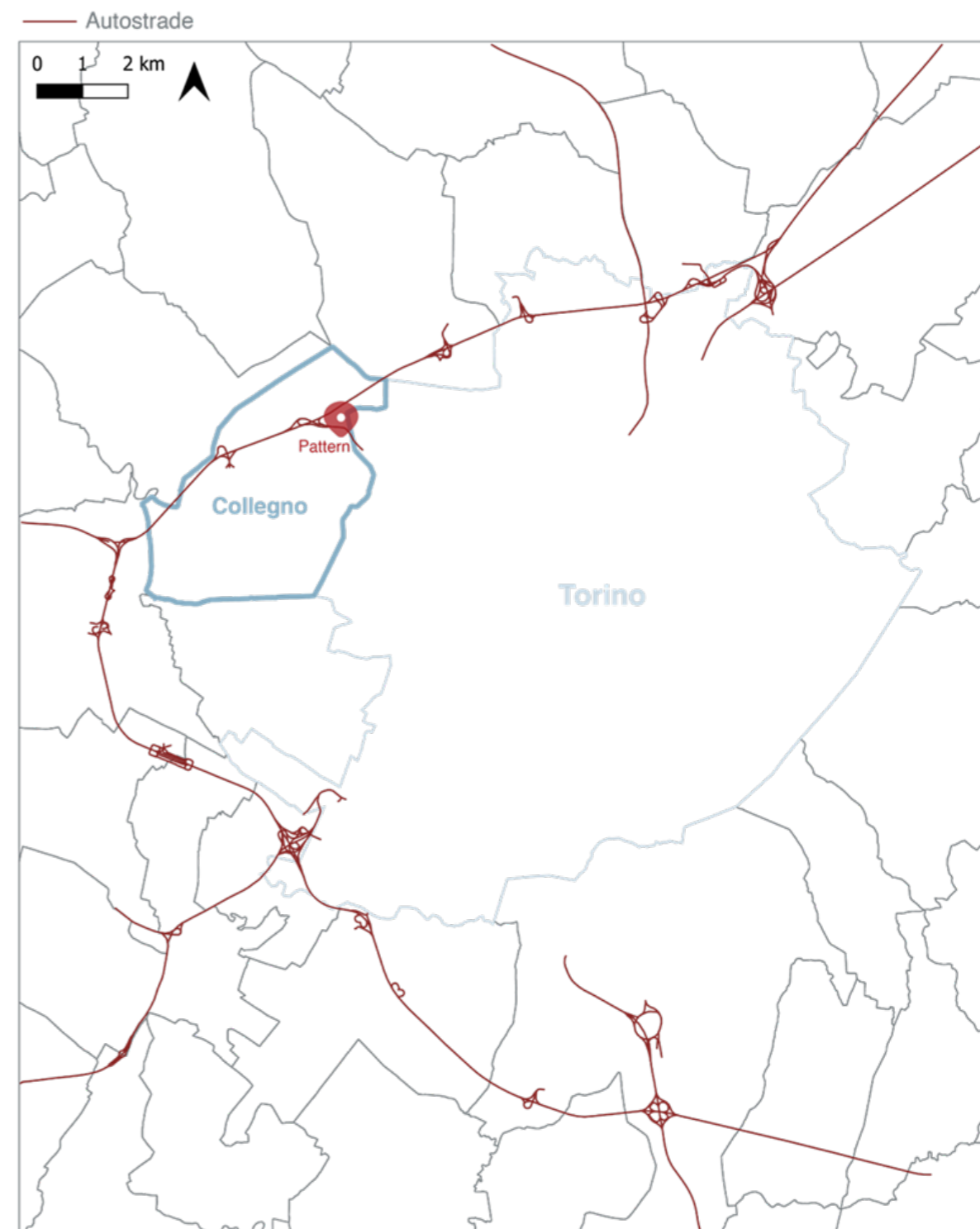


Figura 16: Inquadramento territoriale del caso studio (elaborazione personale)



Figura 17: Render di progetto tratto da (Fagone La Zita, 2024)



Figura 18: Render di progetto tratto da (Fagone La Zita, 2024)

3.3. Requisiti LEED Gold e ruoli degli attori

Ognuno degli attori principali del progetto svolge un ruolo specifico in base ai prerequisiti e i crediti necessari per raggiungere la certificazione LEED Gold. Ciò è definito tramite il documento di “Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto” redatto da GET Consulting di cui si riportano di seguito degli estratti sintetizzati e rielaborati.

Tabella 6: Ruoli Processo integrato (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)

Progetto integrato

Y	?	N	Prerequisito/Credito	Strategia di progetto e costruzione
1			Iterative Process	Durante la progettazione esecutiva saranno elaborati modelli semplificati dell'edificio, con particolare attenzione alle prestazioni energetiche e idriche. Simulazioni specifiche supporteranno l'individuazione di strategie volte alla riduzione dei relativi consumi. Responsabilità: consulenza

Tabella 7: Sito e trasporti (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)

Sito e trasporti

Y	?	N	Prerequisito/Credito	Strategia di progetto e costruzione
			LEED for Neighborhood Development Location	Non applicabile.
1			Sensitive Land Protection	L'area di progetto si trova in un sito ad oggi non edificato. Responsabilità: consulenza
			2 High Priority Site	Non perseguibile.
			5 Surrounding Density and Diverse Uses	Non perseguibile data la localizzazione dell'edificio.
			5 Access to Quality Transit	Non perseguibile data la localizzazione dell'edificio.
			1 Bicycle Facilities	Non perseguibile data la localizzazione dell'edificio.
1			Reduced Parking Footprint	Ai fini dell'acquisizione del credito occorre prevedere al massimo n. 80 posti auto. Responsabilità: gruppo di progettazione/committenza
1			Green Vehicles	Il progetto prevede l'installazione di colonnine di ricarica conformi ai requisiti LEED per almeno il 2% dei posti auto, nonché l'individuazione, tramite segnaletica dedicata, di posti preferenziali per veicoli a basse emissioni pari ad almeno il 5% del totale. Responsabilità: gruppo di progettazione

Tabella 8: *Sostenibilità del sito (a cura di (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)*

Sostenibilità del sito

Y	?	N	Prerequisito/Credito	Strategia di progetto e costruzione
			Construction Activity Pollution Prevention	Durante le attività di cantiere sarà attuato un piano di controllo dell'erosione e della sedimentazione (ESC Plan) conforme al CGP EPA 2012, con verifiche periodiche documentate mediante audit. Responsabilità: appaltatore
1			Site Assessment	I documenti di site survey e site assessment, elaborati sulla base delle valutazioni del team di progetto, riporteranno informazioni su topografia, idrologia, clima, vegetazione, suolo, uso del suolo ed effetti sulla salute umana. Responsabilità: consulenza/gruppo di progettazione
	2		Site Development – Protect or Restore Habitat	Non perseguibile.
1			Open Space	Il sito di progetto prevede una parte superiore al 30% aperta e non costruita. Di questo 30% almeno il 25% sarà a verde fruibile. Responsabilità: gruppo di progettazione
3			Rainwater Management	Il progetto adotta diverse strategie per la gestione sostenibile delle acque meteoriche, tra cui aree verdi e posteggi permeabili, sistemi di raccolta e riuso dell'acqua piovana per usi irrigui (circa 50–100 m³), e il trattamento delle acque scolanti da superfici impermeabili mediante disoleazione, laminazione e dispersione nel suolo. Ai fini LEED, sarà gestito in sito almeno il volume di pioggia corrispondente al 90° percentile degli eventi meteorici giornalieri degli ultimi 10 anni. Responsabilità: gruppo di progettazione
2			Heat Island Reduction	Il progetto dovrà soddisfare i requisiti del credito LEED mediante l'adozione di strategie quali: copertura con membrana impermeabile ad alto indice di riflettanza solare (SRI > 82), superfici pedonali con materiali chiari (SR > 32), pavimentazioni permeabili per i parcheggi (foratura > 50% o prato armato), ombreggiamento delle aree carrabili e pedonali, e utilizzo di asfalto chiaro. Responsabilità: appaltatore/gruppo di progettazione
1			Light Pollution Reduction	Per ottenere il credito, sarà necessario valutare il progetto dell'illuminazione esterna, considerando l'inquinamento luminoso oltre i confini del progetto, misurato sul piano verticale, in relazione alle esigenze di illuminazione dei percorsi esterni. Inoltre, si dovranno evitare lampade con ottica che emetta luce verso la volta celeste. Responsabilità: gruppo di progettazione

Tabella 9: *Efficientamento idrico (a cura di (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)*

Efficientamento idrico

Y	?	N	Prerequisito/Credito	Strategia di progetto e costruzione
			Outdoor Water Use Reduction	Per soddisfare il prerequisito LEED è richiesta una riduzione minima del 30% del consumo idrico per l'irrigazione. Una riduzione del 50% consente di acquisire 1 punto, mentre il 100% ne assegna 2 ai fini del credito WEc Outdoor Water Use Reduction. Il progetto del verde sarà sviluppato nelle fasi successive, seguendo criteri di sostenibilità quali: impiego di specie autoctone o adattate, esclusione del prato all'inglese, preferenza per essenze a basso fabbisogno idrico, e adozione di sistemi di irrigazione efficienti e controllati. Responsabilità: gruppo di progettazione
			Indoor Water Use Reduction	Per soddisfare il prerequisito LEED è necessaria una riduzione minima del 20% del consumo idrico. In assenza di un sistema duale per l'alimentazione dei WC, il progetto dovrà prevedere apparecchi idrico-sanitari ad alta efficienza per massimizzare il punteggio nel credito WEc Indoor Water Use Reduction, tra cui: vasi a doppio scarico (2–4 lpf), rubinetti (1,35 l/min), docce (5 l/min, se previste) e rubinetti da cucina (6 l/min). Responsabilità: appaltatore/gruppo di progettazione
			Building-Level Water Metering	Il prerequisito è soddisfatto se l'edificio è dotato di un contatore volumetrico per il consumo totale di acqua potabile, che può coincidere con il contatore fiscale, a condizione che sia accessibile per la lettura mensile dei consumi. Responsabilità: gruppo di progettazione
2			Outdoor Water Use Reduction	Si faccia riferimento al prerequisito WEp Outdoor Water Use Reduction
6			Indoor Water Use Reduction	Si faccia riferimento al prerequisito WEp Indoor Water Use Reduction
	2		Cooling Tower Water Use	<i>Non perseguibile</i>
1			Water Metering	Per il conseguimento del credito, è necessaria la contabilizzazione separata dei seguenti usi idrici: irrigazione, acqua fredda per WC, docce e rubinetti (esclusi quelli per usi di processo), e totale dell'acqua calda per usi sanitari. Responsabilità: gruppo di progettazione

Tabella 10: *Energia ed emissioni atmosferiche (a cura di GET Consulting s.r.l, Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ, 04/08/2023; elaborazione personale)*

Energia ed emissioni atmosferiche

Y	?	N	Prerequisito/Credito	Strategia di progetto e costruzione
			Fundamental Commissioning and Verification	Durante la progettazione e costruzione, saranno eseguite le attività di Commissioning (Cx) sugli impianti MEP, sui sistemi di produzione di energia rinnovabile e sull'involucro, in conformità con le linee guida ASHRAE 0-2005 e ASHRAE 1.1-2007 per i sistemi HVAC&R e con i requisiti LEED per il prerequisito e il credito EAc Enhanced Commissioning. Responsabilità: appaltatore/consulenza
			Minimum Energy Performance	È stata effettuata una verifica preliminare del risparmio energetico ai fini LEED, utilizzando dati di consumo benchmark secondo la norma ASHRAE 90.1.2010. La stima prevede il conseguimento del prerequisito e l'ottenimento di 10 punti per il credito EAc Optimize Energy Performance, considerando un sistema fotovoltaico da 205 kW di picco. Responsabilità: consulenza/gruppo di progettazione

		Building-Level Energy Metering	Il prerequisito è soddisfatto se l'edificio è dotato di un contatore generale per il consumo di tutte le fonti energetiche, che può coincidere con il contatore fiscale, a condizione che sia accessibile per la lettura mensile dei consumi. Responsabilità: gruppo di progettazione
		Fundamental Refrigerant Management	Il prerequisito si intende verificato in quanto in Italia è già bandito l'uso di refrigeranti CFC. Responsabilità: gruppo di progettazione
4	2	Enhanced Commissioning	Si faccia riferimento al prerequisito EAp Fundamental Commissioning and Verification
10	8	Optimize Energy Performance	Si faccia riferimento al prerequisito EAp Minimum Energy Performance
1		Advanced Energy Metering	Il sistema prevede il monitoraggio e la memorizzazione dei dati, per almeno 36 mesi, dei seguenti usi finali che superano il 10% del consumo totale, separatamente: illuminazione, FM, processo, climatizzazione, ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria. Responsabilità: gruppo di progettazione
	1	Demand Response	Credito non perseguito.
3		Renewable Energy Production	Il progetto prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico da 205 kWp in copertura. La verifica preliminare indica che l'impianto copre oltre il 20% del consumo totale dell'edificio, corrispondente a 3 punti. Responsabilità: gruppo di progettazione
	1	Enhanced Refrigerant Management	Il requisito sarà verificato al termine della progettazione esecutiva, sulla base dei seguenti dati: potenza frigorifera di ciascuna macchina contenente refrigerante, carica totale di refrigerante del sistema e tipo di refrigerante. Responsabilità: appaltatore/gruppo di progettazione
1	1	Green Power and Carbon Offsets	Attraverso questo credito e il precedente "Renewable Energy Production" nella versione 4.1 di LEED, si ottengono due punti aggiuntivi grazie all'impianto fotovoltaico previsto nel progetto. Responsabilità: gruppo di progettazione
		Storage and Collection of Recyclables	È necessario prevedere aree dedicate per la raccolta e lo stoccaggio dei materiali riciclabili (carta, vetro, plastica, metalli), accessibili sia ai trasportatori di rifiuti che agli occupanti dell'edificio. Inoltre, bisogna garantire una gestione sicura di batterie e rifiuti elettronici durante la raccolta, lo stoccaggio e lo smaltimento. Responsabilità: gruppo di progettazione/committenza
		Construction and Demolition Waste Management Planning	Durante la fase di cantiere, dovrà essere sviluppato e implementato un piano di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione (CDWM Plan), che definisca gli obiettivi di differenziazione dei rifiuti, identificando almeno cinque materiali da separare per almeno il 75% dei rifiuti totali prodotti. Il piano dovrà specificare se i materiali saranno separati o mescolati e descrivere le strategie di diversificazione adottate. Responsabilità: appaltatore

	3	2	Building Life-Cycle Impact Reduction	Dopo la progettazione esecutiva, sarà effettuata una valutazione del ciclo di vita della struttura e dell'involucro, dimostrando una riduzione minima del 10% rispetto a un edificio di riferimento in tutte e sei le categorie di impatto: potenziale di riscaldamento globale (CO ₂ e), impoverimento dello strato di ozono (kg CFC-11), acidificazione dei terreni e delle acque (moli di H ⁺ o kg SO ₂), eutrofizzazione (kg di azoto o fosfati), formazione di ozono troposferico (kg di NO _x o etene) ed esaurimento delle risorse energetiche non rinnovabili (MJ). Responsabilità: appaltatore/gruppo di progettazione/consulenza
f	1	1	BPDO – Sourcing of Raw Materials (LEEDv4.1)	Selezionare prodotti edili per un valore pari ad almeno il 15% del costo totale dei materiali (30% per 2 punti), che presentano le seguenti caratteristiche: contenuto di materiale riciclato pre e/o post consumo, certificazione FSC con COC per i prodotti in legno, e attestazione "biobased". Responsabilità: appaltatore
	1	1	BPDO- Material Ingredients (LEED-Dv4.1)	Selezionare un numero minimo di 5 materiali da 3 fornitori diversi, con certificazione C2C o Declare, HPD o similari accettati dal sistema LEED Responsabilità: appaltatore
	2		Construction and Demolition Waste Management	Si faccia riferimento al prerequisito MRp Construction and Demolition Waste Management Planning Responsabilità: appaltatore
			Minimum Indoor Air Quality Performance	L'edificio prevede la ventilazione meccanica per tutti gli spazi occupati, in conformità con la norma ASHRAE 62.1.2010, sez. 4-7. Per ogni sistema di ventilazione, dovrà essere implementato il monitoraggio della portata di aria esterna tramite dispositivi conformi ai requisiti LEED. Responsabilità: gruppo di progettazione
			Environmental Tobacco Smoke Control	Il prerequisito LEED vieta di fumare all'interno e all'esterno dell'edificio, ad eccezione delle aree fumatori designate, situate a almeno 7,5 metri da ingressi, prese d'aria esterne e finestre apribili. Deve essere prevista una cartellonistica di divieto di fumo. Responsabilità: committenza/gruppo di progettazione
			BPDO – Sourcing of Raw Materials (LEEDv4.1)	Selezionare prodotti edili corrispondenti ad almeno il 15% in costo del totale dei materiali edili per l'edificio (30% per 2 punti), che abbiano le seguenti caratteristiche: Contenuto di riciclato di pre e/o post consumo; Certificazione FSC con COC per i prodotti in legno; Attestazione "biobased".
	2		Enhanced Indoor Air Quality Strategies	Per l'ottenimento di 2 punti LEED, è richiesta l'implementazione delle seguenti misure: tappeti tecnici permanenti di almeno 3 metri agli ingressi principali per il controllo delle polveri; estrazione diretta dell'aria da locali contenenti sostanze pericolose, con porte autochiudenti e pareti a tutta altezza; filtri di classe F7 su tutte le unità di ventilazione che immettono aria esterna; incremento del 30% delle portate d'aria rispetto ai requisiti minimi della norma ASHRAE 62.1:2010; installazione di sensori di CO ₂ nelle aree ad alta densità di occupazione. Responsabilità: gruppo di progettazione

3	Low-Emitting Materials (LEEDv4.1)	Si considera il passaggio a LEEDv4.1. Selezionare il 100% delle pitture e rivestimenti, adesivi e sigillanti, pavimenti, e controsoffitti o isolanti termoacustici interni bassoemissivi, ovvero a basso contenuto e basse emissioni di VOC. Responsabilità: appaltatore
1	Construction Indoor Air Quality Management Plan	In fase di cantiere, elaborare e implementare un piano di gestione della qualità dell'aria (IAQ Plan). Responsabilità: appaltatore
2	Indoor Air Quality Assessment (LEEDv4.1)	Si prevede il passaggio a LEEDv4.1. Al termine della costruzione e prima dell'occupazione, dovranno essere effettuate prove di qualità dell'aria interna, in condizioni di ventilazione tipiche, per misurare il particolato e i gas inorganici (1 punto) e i composti organici volatili (1 punto). Responsabilità: appaltatore
1	Thermal Comfort	Non perseguito.
1	1 Interior Lighting	Il requisito sarà perseguito secondo la versione 4.1 del protocollo LEED. Il progetto illuminotecnico dovrà prevedere lampade con CRI > 90, un valore di UGR < 19 in tutti gli ambienti regolarmente occupati e, per almeno il 90% di tali spazi, finiture con riflettenza ≥ 80% per i soffitti e ≥ 55% per le pareti; ove applicabile, riflettenza ≥ 45% per i piani di lavoro e ≥ 50% per le pareti mobili. È inoltre richiesto il rispetto della sezione 9.4 della norma ASHRAE 90.1:2010. Responsabilità: gruppo di progettazione
1	1 Daylight	Simulazioni in fase esecutiva. Responsabilità: consulenza
1	Quality Views	Non perseguibile
1	Acoustic Performance	Perfor- In fase di progettazione esecutiva si approfondirà l'ottenimento del credito, valutando il passaggio alla versione LEED v4.1. Il progetto è orientato al rispetto di almeno due tra i seguenti parametri: tempo di riverberazione (media a 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz) e STC tra ambienti adiacenti. Inoltre, il livello di rumore di fondo dovrà essere conforme ai limiti previsti dai sistemi HVAC secondo il 2015 ASHRAE Handbook – HVAC Applications, Capitolo 48, Tabella 1; lo Standard AHRI 885-2008, Tabella 15; o normative equivalenti locali. Responsabilità: gruppo di progettazione

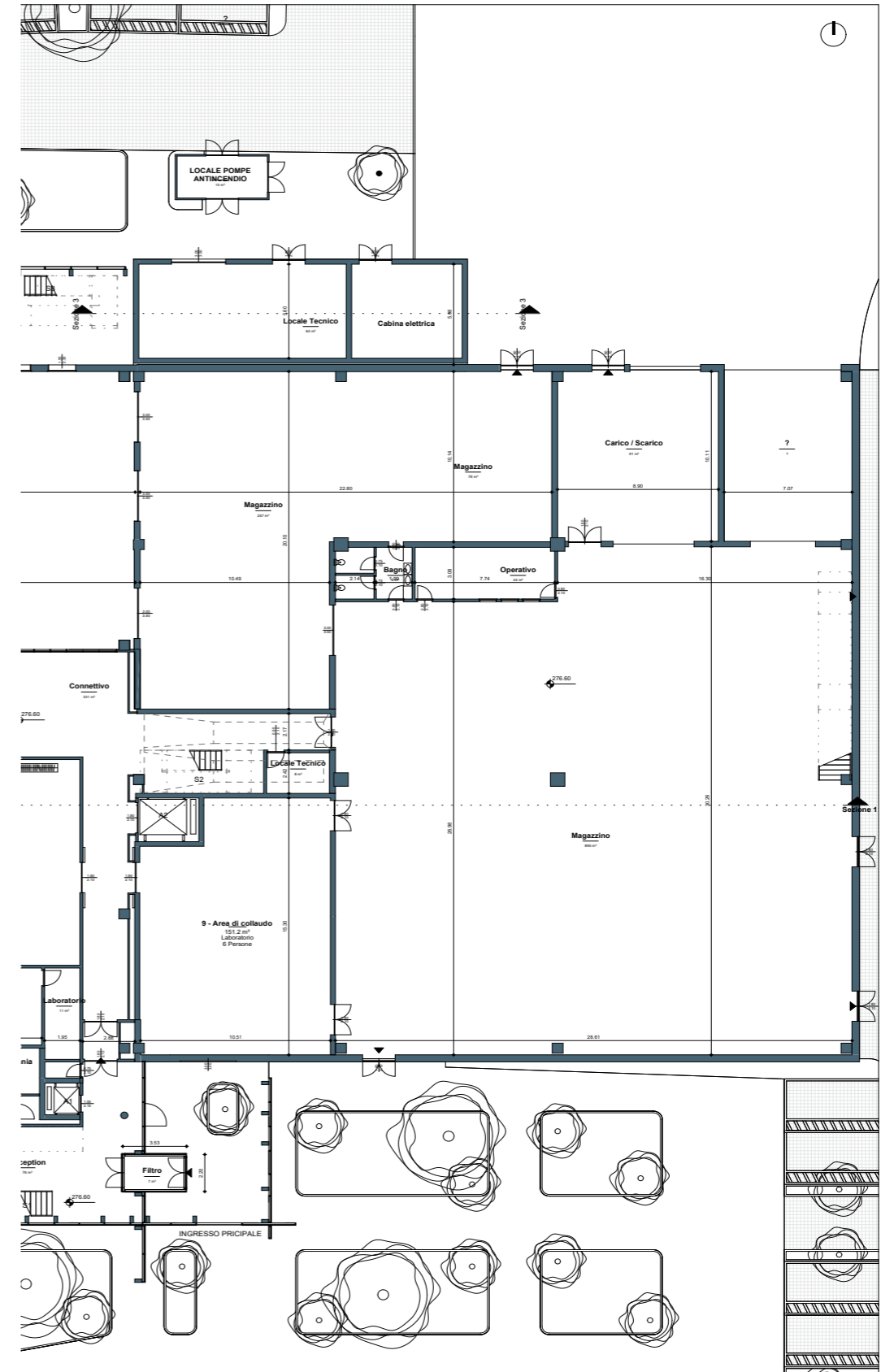
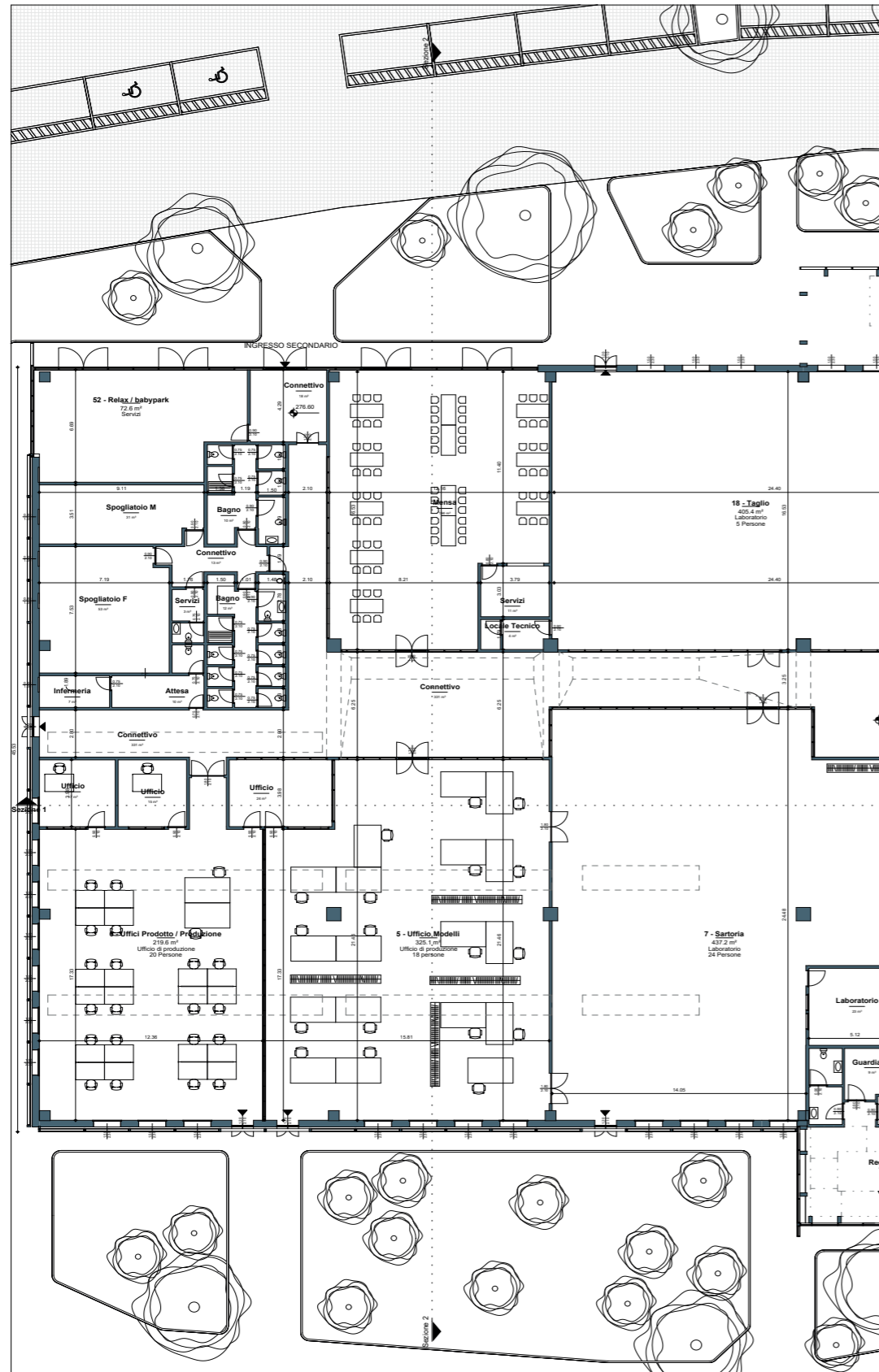


Figura 19: Pianta piano terra (a cura di SMA Progetti)

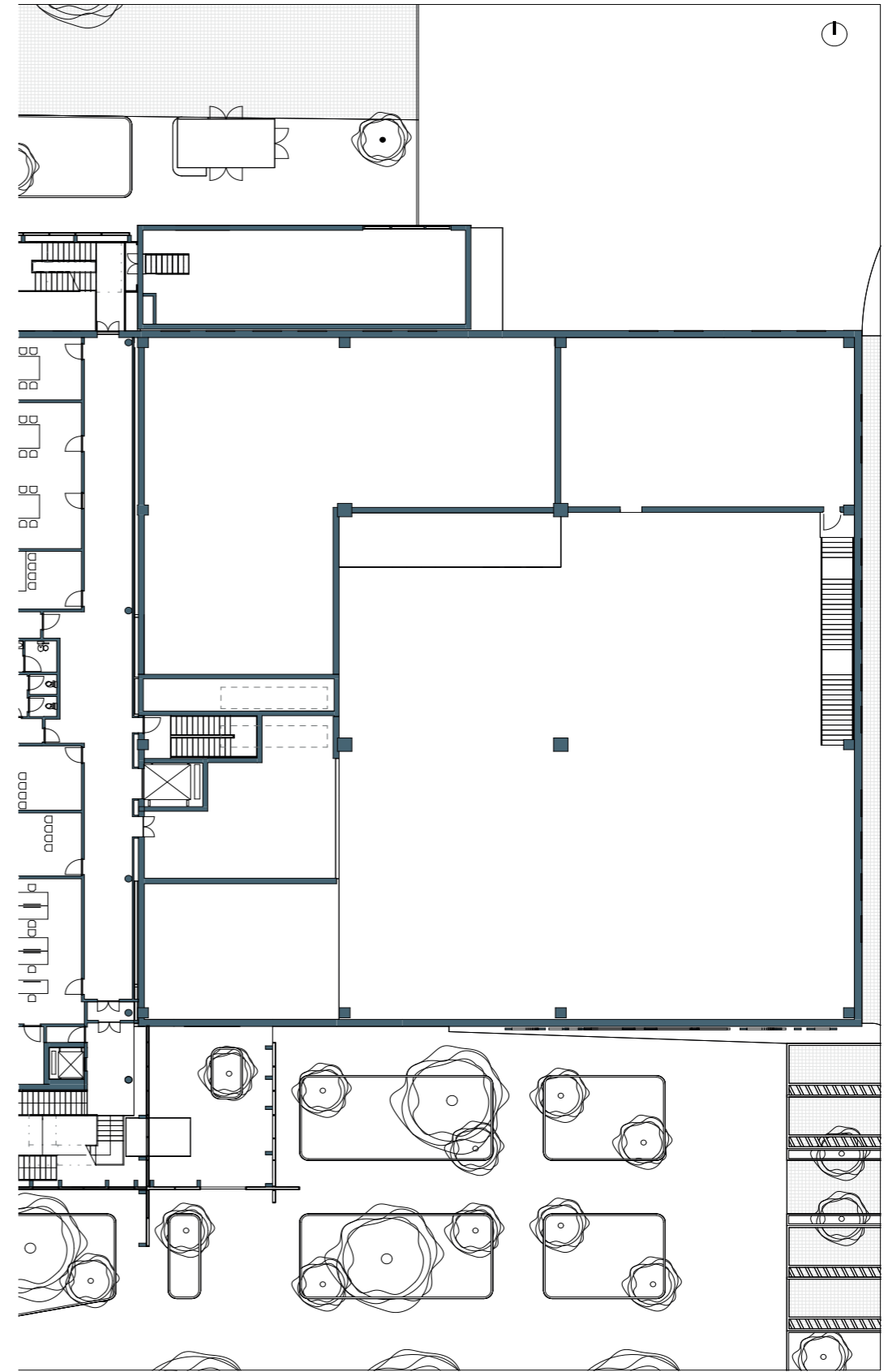
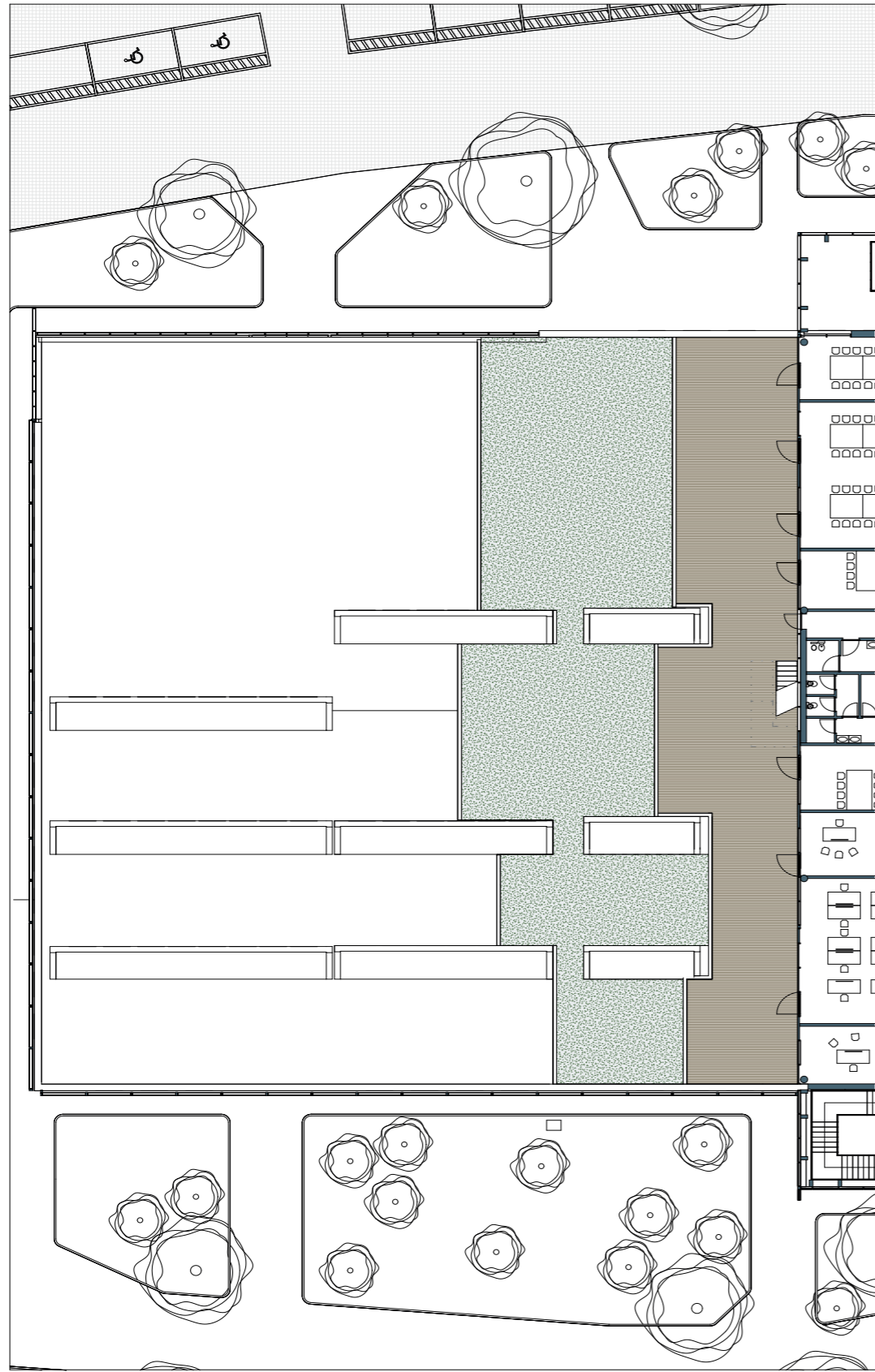


Figura 20: Pianta piano primo (a cura di SMA Progetti)

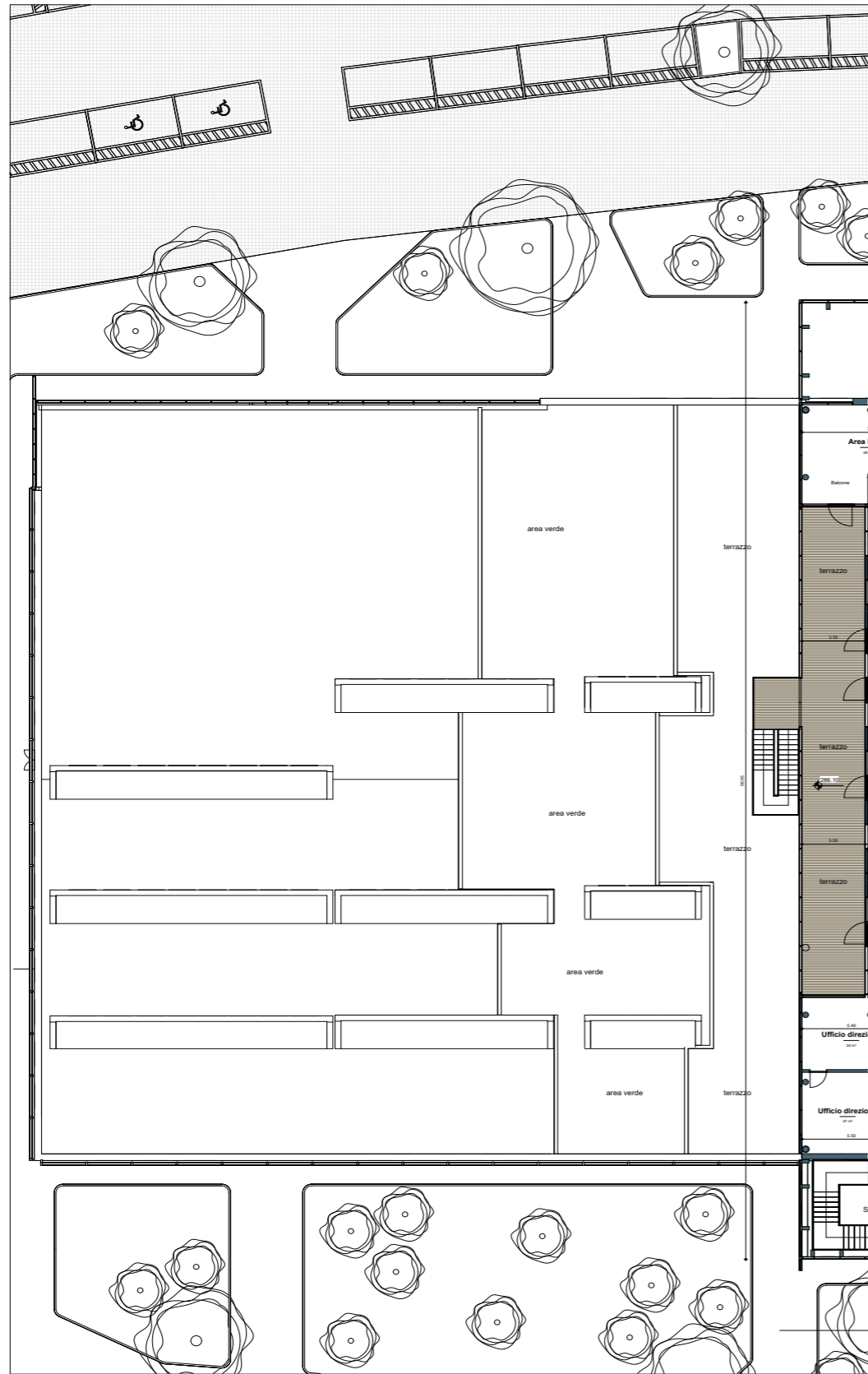
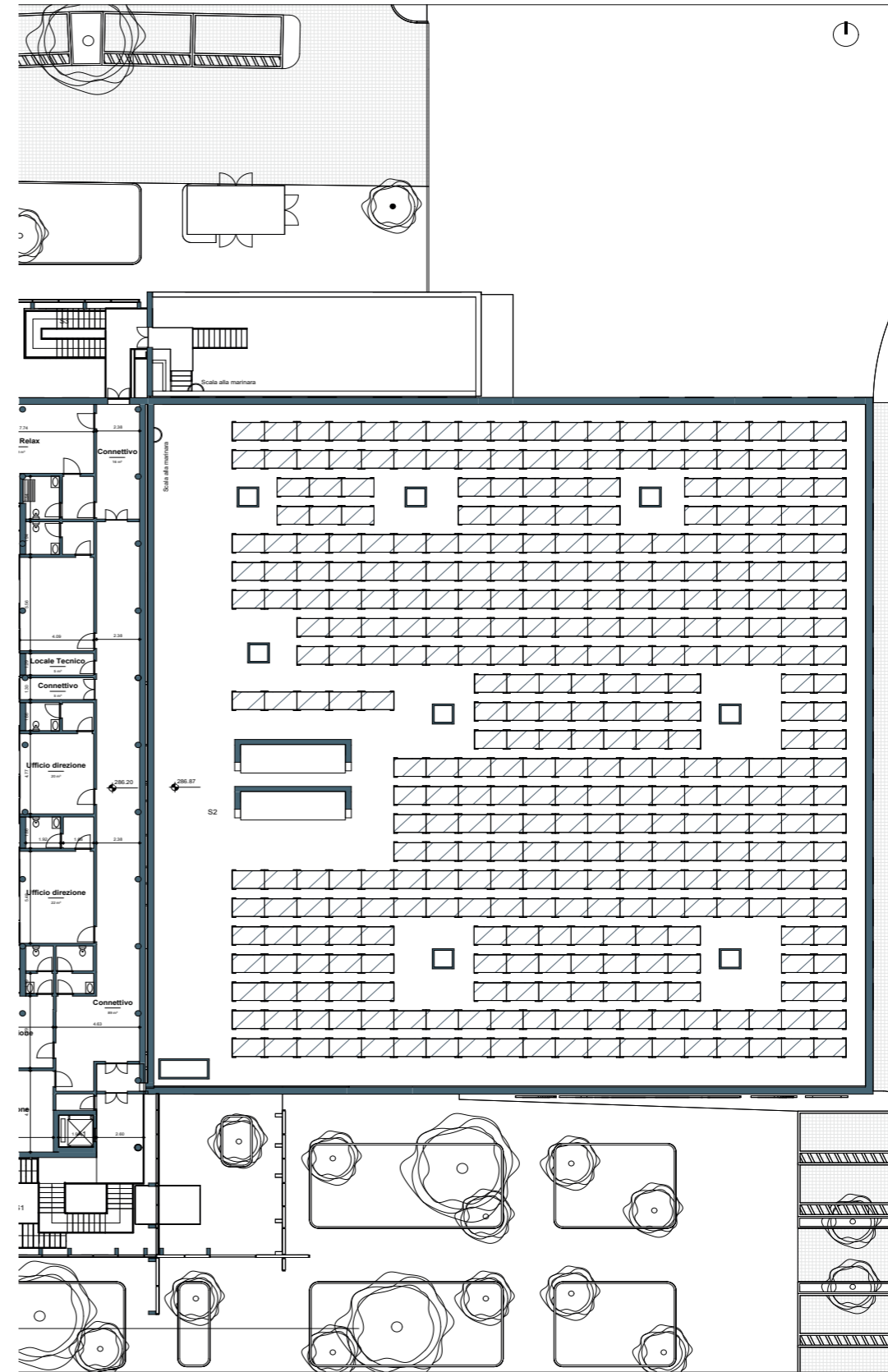


Figura 21: Pianta piano secondo (a cura di SMA Progetti)



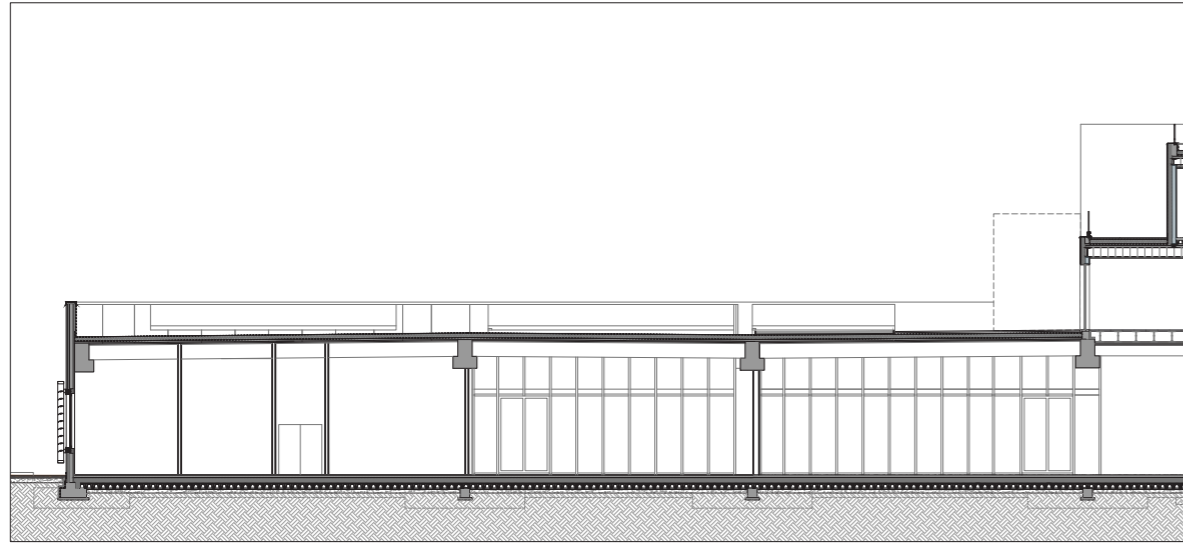


Figura 22: Sezione A-A, figura sopra (a cura di SMA Progetti)

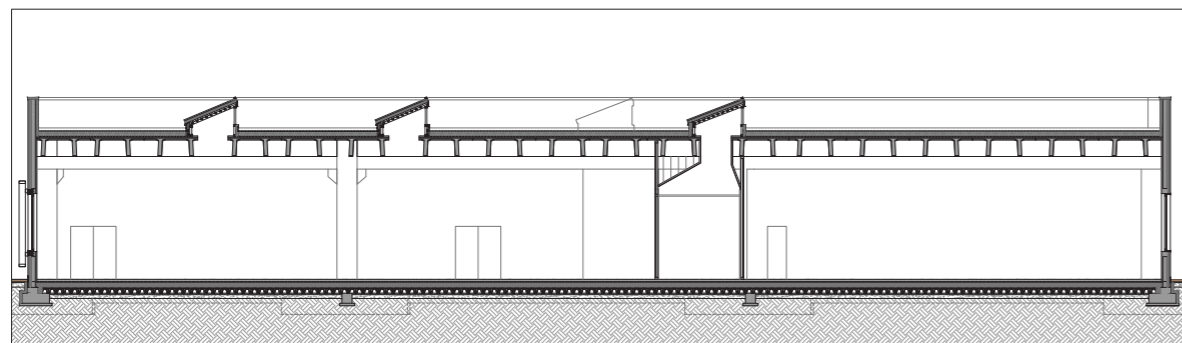
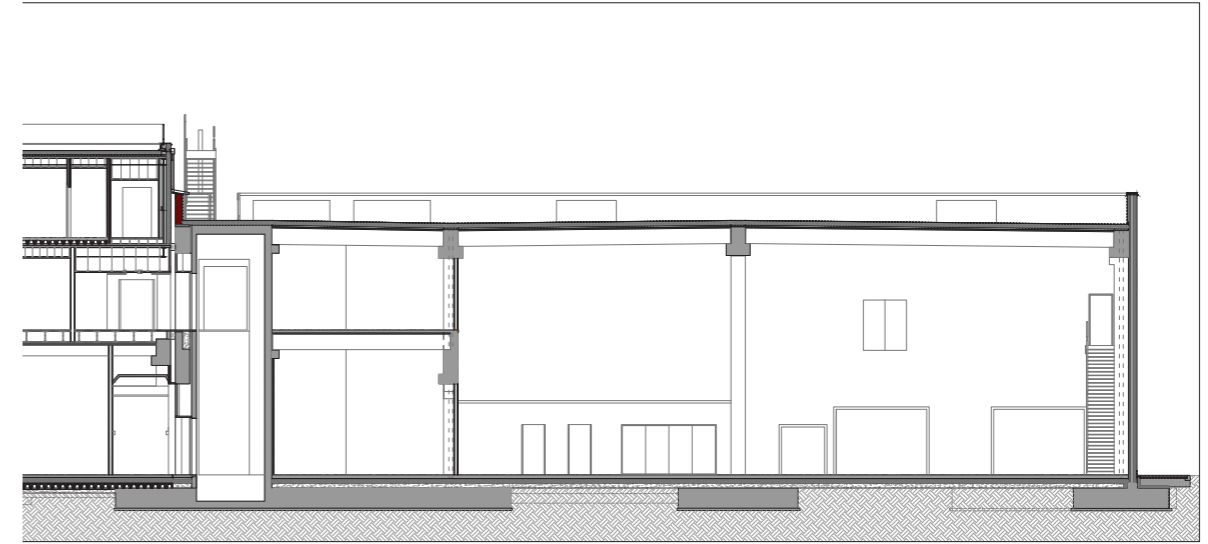


Figura 23: Sezione B-B, figura a lato (a cura di SMA Progetti)

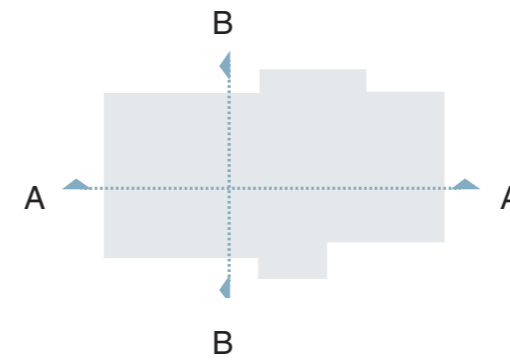


Figura 24: Keyplan delle sezioni (a cura di SMA Progetti)

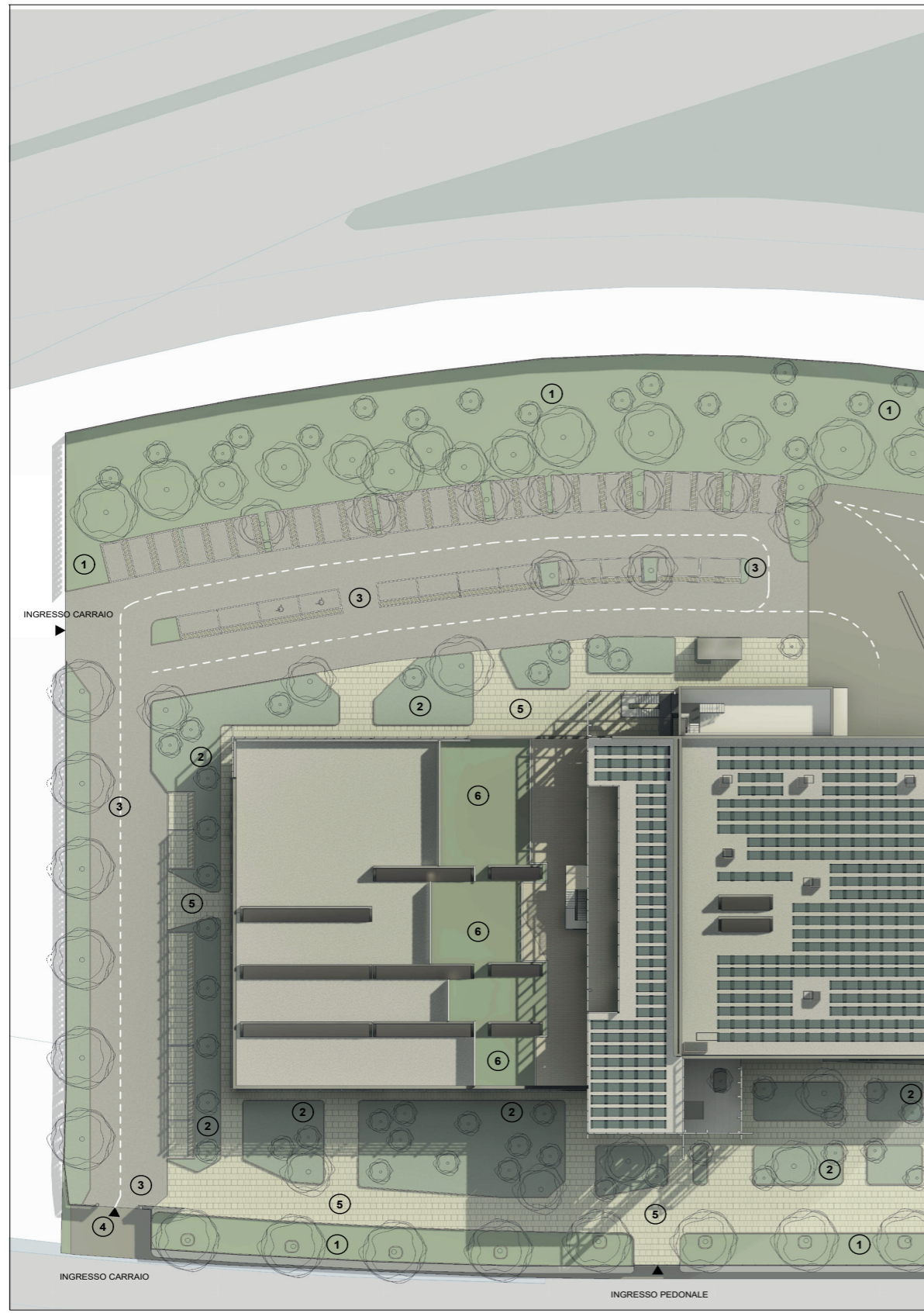
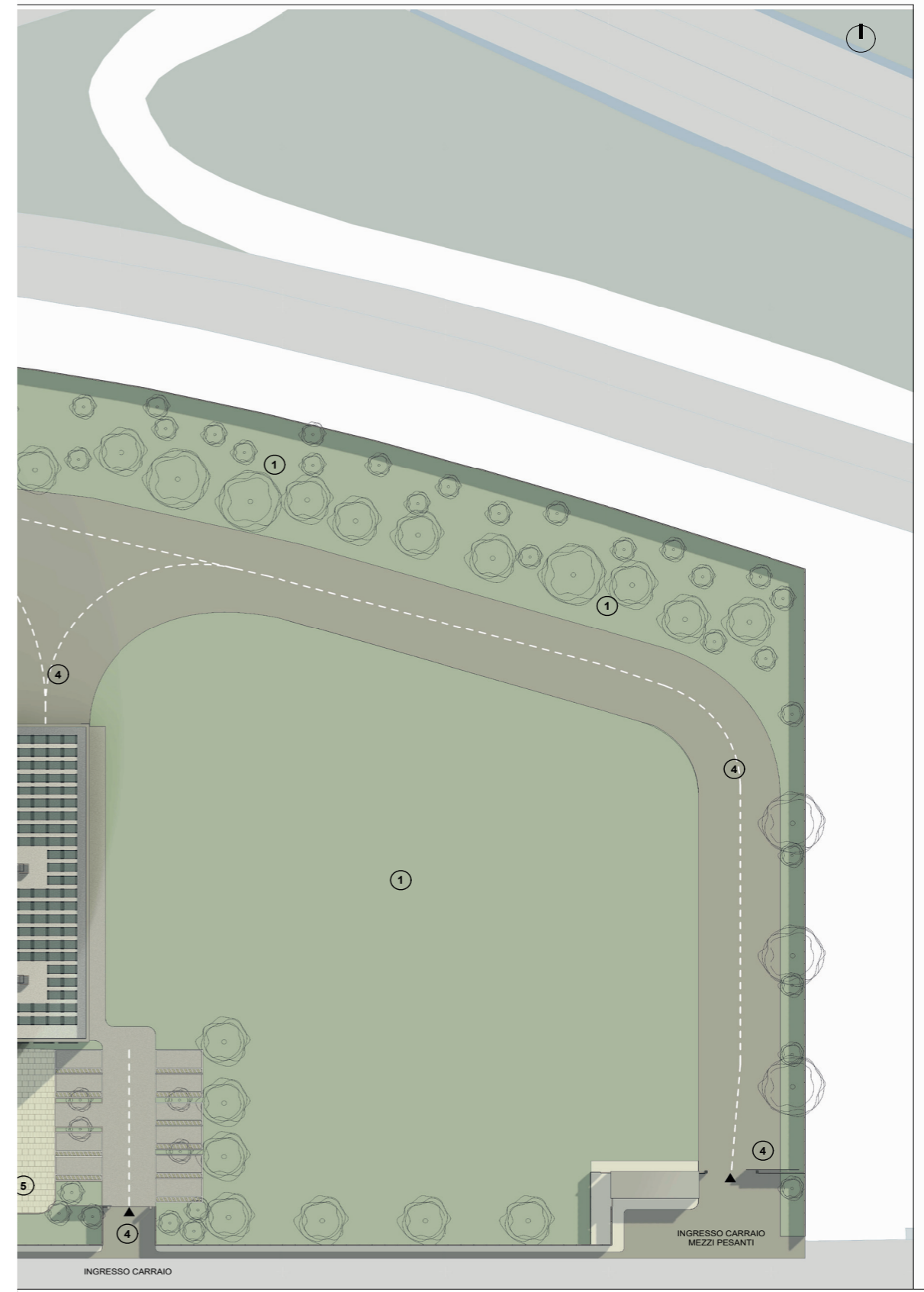


Figura 25: Planivolumetrico (a cura di SMA Progetti)



3.4. Progetto architettonico

La maggior parte della superficie dell'edificio si sviluppa al piano terra in cui sono presenti le aree di lavorazione e i locali destinati ai servizi per il personale. Il magazzino occupa una quota importante del volume dell'edificio poiché è a doppia altezza e ospita i locali di stoccaggio dei prodotti. Gli uffici sono situati al primo e al secondo piano. Entrambi questi livelli hanno un'area ridotta rispetto al piano terra dell'edificio.

Il solaio controterra differisce in base alla tipologia degli spazi. Infatti, per l'area delle lavorazioni e dei servizi, è presente un vespaio aerato realizzato tramite iglù su cui successivamente viene inserito uno strato di coibentazione in XPS e un sistema di pannelli radianti per il riscaldamento degli ambienti interni con pavimentazione in piastrelle di grès. Invece, nella parte dedicata al magazzino il vespaio aerato è sostituito da un volume maggiore di riempimento in riciclato a cui seguono un doppio strato di XPS per l'isolamento, pannelli radianti e una pavimentazione industriale elicotterata con rete eletrosaldata per una maggiore resistenza ai carichi.

Dal punto di vista costruttivo, il piano terra è realizzato con una struttura portante a telaio in elementi prefabbricati in calcestruzzo armato rivestiti da una lamiera metallica. I tamponamenti sono realizzati con pannelli prefabbricati opachi, anch'essi in calcestruzzo armato, oppure con moduli vetrati con telaio in alluminio schermati opportunamente da un sistema di ombreggiamento a lamelle in alluminio orizzontali color bianco. I livelli superiori, invece, presentano una struttura a telaio con profili IPE e HEA di dimensioni variabili; mentre i tamponamenti rimangono invariati.

All'interno, le divisioni tra gli ambienti sono realizzate con pareti a secco realizzate con pannelli in cartongesso standard o idrolastra in base alle esigenze. La struttura metallica a montanti e traversi costituisce la parte resistente, mentre l'isolamento si ottiene grazie alla messa in posa di pannelli di lana di vetro, lana di roccia, XPS e stiferite che variano a seconda della natura degli spazi e di conseguenza, alla tipologia di muratura utilizzata. Come rifinite sono presente dei controsoffitti in lastre di cartongesso, rivestimento in piastrelle di grès per le pareti dei servizi igienici, e in pittura per le pareti degli altri locali.

La copertura piana è impermeabilizzata mediante una guaina in PVC e isolata tramite pannelli in EPS, mentre lo strato di rivestimento è costituito da una guaina bituminosa. Una porzione soprastante gli ambienti lavorazione è realizzata come tetto verde.

Per quanto riguarda le aree esterne, è presente una pavimentazione in autobloccanti drenanti per i passaggi pedonali e carrabili; mentre si trova una pavimentazione in autobloccanti forati inerbiti per le aree di parcheggio. Aree verdi irrigate e non irrigate completano il quadro delle aree esterne.

3.5. Progetto impiantistico

L'intero progetto è stato concepito per garantire l'efficienza energetica e il rispetto dell'ambiente, con l'utilizzo esclusivo di energia elettrica e gas provenienti da fonti rinnovabili, in linea con i requisiti LEED. Tra gli obiettivi, il controllo dell'illuminazione, la gestione delle portate d'aria e l'efficienza della pompa di calore geotermica, seguendo le normative ASHRAE e un confronto con la normativa italiana UNI 10339:1995. La potenza motrice è stata dimensionata considerando gli elevati assorbimenti delle pompe di calore.

3.5.1. Impianto di climatizzazione

L'impianto di climatizzazione si avvale di una pompa di calore ad acqua di falda, supportata da trivellazioni eseguite da Geonovis per la realizzazione dei pozzi. Sono stati installati puffer per l'accumulo di calore e freddo, oltre a un puffer esterno da 300 litri con quattro attacchi, collegato al sistema generale, il quale si adatta automaticamente alle esigenze di riscaldamento o raffrescamento.

Il sistema è suddiviso in tre circuiti distinti:

1. Un circuito dedicato agli uffici situati al primo piano.
2. Un circuito per la produzione al piano terra.
3. Un circuito per il magazzino, trattato come ambiente indipendente in quanto dotato di pavimento radiante, essendo l'unica area a doppia altezza.

Per quanto riguarda i terminali, nella zona produttiva sono stati installati dei termoventilanti, ovvero ventilconvettori canalizzati ad alta prevalenza, mentre gli uffici sono dotati di ventilconvettori tradizionali. Il pavimento radiante è stato configurato per operare a una temperatura di set point più bassa. Il sistema di pompaggio è composto da due pompe gemellari che operano in alternanza per gli uffici e la produzione, mentre una valvola di miscelazione regola il funzionamento del magazzino che richiede temperature inferiori.

Il controllo dell'aria è garantito da due Unità di Trattamento Aria (UTA), una al piano terra e una per gli uffici, dotate di regolatore rotativo entalpico. È stata inoltre prevista la possibilità di aggiungere un gruppo frigo a supporto della pompa di calore, per garantire una maggiore efficienza rispetto ai carichi previsti.

L'impianto è configurato con una soluzione a quattro tubi che consente di riscaldare e raffrescare ambienti diversi simultaneamente. Sono stati installati collettori separati per la distribuzione a bassa temperatura e refrigerata. Nei bagni, il

riscaldamento è affidato a radiatori, mentre nell'ufficio della sicurezza è presente un sistema di espansione diretta. Gli altri locali dispongono di ventilconvettori canalizzati, utilizzati solo per l'aria secondaria.

La sala reception, caratterizzata da ampie superfici vetrate, è dotata di pavimento radiante e ventilconvettori a pavimento, per gestire i carichi termici estivi. L'involucro edilizio è stato realizzato con soluzioni prefabbricate in pannelli di EPS e cemento, e travi a T che sostengono i lucernari, progettati per illuminare i corridoi. I vetri selettivi sono stati scelti in base all'esposizione delle facciate.

3.5.2. Sistema elettrico e illuminazione

L'impianto elettrico prevede l'utilizzo della media tensione della rete torinese, con una cabina di smistamento posta al confine della proprietà e collegata alla cabina interna di Pattern. L'edificio è dotato di un impianto fotovoltaico da 210-215 kW, inclinato a 10° ed esposto a sud, progettato per garantire l'autoconsumo, con un minimo immissione in rete, in conformità ai requisiti di legge.

L'illuminazione è gestita attraverso apparecchiature a binario con sensori di presenza e crepuscolari, su richiesta del committente, evitando così la possibilità di controllo manuale da parte dei dipendenti. È stato inoltre installato un sistema di rilevazione incendi ad aspirazione e predisposti punti di alimentazione per le tende su tutti i serramenti.

3.5.3. Domotica e gestione impiantistica

Il sistema di gestione degli impianti, incluso ventilconvettori, radiatori e schermature, è integrato con il sistema domotico ELECTRON, che opera su BAS con protocollo BACNET. Questo sistema, più semplice rispetto a un BMS centrale, rispetta comunque le specifiche LEED. Ogni ventilconvettore è dotato di un regolatore ON/OFF, con controllo esteso anche ai radiatori.

Le postazioni di lavoro sono dotate di punti dati per la raccolta e l'elaborazione delle informazioni, nell'ambito dell'industria 4.0, con la possibilità di passare a un modello di industria 5.0. Misurazioni sui quadri elettrici delle aree produttive hanno permesso di caratterizzare le curve di carico, contribuendo alla corretta compilazione dei profili di utilizzo dei macchinari.

4. Contabilizzazione EC e OC del caso studio

Il capitolo descrive la metodologia utilizzata per valutare le emissioni di CO₂ equivalenti del caso di studio, seguendo le indicazioni del documento “Strumenti per la decarbonizzazione: Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio” (2024) a cura di R. Giordano e J. Andreotti. La metodologia comprende le fasi del ciclo di vita dell’edificio riferite all’ambito minimo di applicazione (A1-A3, A4, A5, B6) esteso includendo le fasi B7, C1, C2, C3-C4. L’intero calcolo è stato strutturato ponendo l’attenzione alla progressiva decarbonizzazione della rete elettrica italiana e alle peculiarità logistiche del sito.

4.1. Confini del sistema

Per la valutazione delle emissioni di CO₂eq del caso di studio, il calcolo è stato strutturato seguendo la metodologia illustrata all’interno della pubblicazione “Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio” scritto da Andreotti J. e Giordano R. ed edito nel 2024.

Il documento sopra citato suggerisce uno scenario minimo di riferimento che comprende nel calcolo i moduli A1-A3, A4, A5 e B6; nel presente caso di studio si è scelto di ampliare la valutazione anche ai moduli B7, C1, C2, C3- C4.

Il calcolo dei vari moduli può essere effettuato utilizzando il metodo base o quello avanzato, a seconda del livello di sviluppo del progetto. Infatti il metodo base prevede un basso livello di dettaglio, mentre invece quello avanzato è applicabile ad un livello di elaborazione più complesso.

Tuttavia, anche in fase di progetto esecutivo, non sempre sono disponibili tutte le informazioni necessarie per applicare il metodo avanzato. Per questo motivo, la scelta della metodologia più appropriata dipende anche dalla disponibilità dei dati.

I moduli B6 e B7 si distinguono rispetto ai metodi di calcolo finora descritti, in quanto fanno riferimento all’Operational Carbon. In particolare, per il modulo B6 è necessario considerare il fabbisogno energetico dell’edificio. Dunque, il calcolo può basarsi su due diversi scenari di riferimento: uno statico, che considera il mix energetico italiano attuale costante per l’intero ciclo di vita dell’edificio, oppure uno variabile, che tiene conto della progressiva decarbonizzazione del mix energetico nazionale nel tempo.

Nello specifico del presente studio, sono stati considerati i fattori di emissione della rete italiana in riferimento agli anni oggetto di studio 2025-2075, la progressiva decarbonizzazione dell’energia elettrica e del cambiamento del mix energetico nazionale dell’Italia⁷⁰, optando quindi per calcolo mediante lo scenario variabile. Inoltre, si sono considerati i seguenti elementi ai fini della stima del fabbisogno energetico annuo, quali l’impianto idrosanitario, l’impianto elettrico e l’impianto di messa a terra.

Per il modulo B7, che tiene conto delle emissioni generate per l’utilizzo/approvvigionamento di acqua, la procedura di calcolo è unificata. La sola variabile è rappresentata dalle tipologie di impianto da considerare: impianti integrati nel manufatto edilizio, impianti integrati aggiuntivi e impianti non integrati. Nel caso analizzato, il calcolo fa riferimento alle prime due tipologie citate.

Indipendentemente dai moduli, il calcolo è stato eseguito sulla base dei disegni del progetto preliminare.

A fronte di tutte le precedenti considerazioni, le scelte di metodologia adottate sono riassunte mediante la seguente tabella.

Tabella 11: Metodo di calcolo utilizzato per i moduli considerati nello studio

Moduli	Metodo di calcolo
A1-A3	Avanzato
A4	Base
A5	Base
B6	Scenario fisso
B7	Impianti integrati e integrati addizionali
C1	Base
C2	Avanzato
C3-C4	Base

Infine, il periodo di riferimento per il ciclo di vita utile dell’edificio adottato nell’analisi è pari a 50 anni trattandosi di un fabbricato a destinazione industriale⁷¹.

4.1.1. EC nella fase di Precostruzione

Come illustrato nel documento nel documento pubblicato da RICS del 2023, i modelli di rendicontazione dell’indicatore di Embodied Carbon devono comprendere tutte le fasi indicate nella norma UNI EN 15643:2021. In base a tale prescrizione, la prima fase da considerare è quella di precostruzione, identificata

70. Per i fattori di emissioni legati al mix energetico per gli anni dal 2025 al 2050 sono stati impiegati i dati presenti nelle tabelle del tratto dalla pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Andreotti J., Giordano R., p.100. Per gli anni successivi fino al 2075 sono stati calcolati considerando la tendenza a progredire sempre più verso le zero emissioni, come riportato nella sezione Allegati.

71. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.36

72. Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), Whole Life Carbon Assessment per the built environment (global), 2023, p.71

dal codice alfanumerico A0 che include processi preliminari non fisici, come studi tecnici, valutazioni d'impatto e del rischio, coinvolgimento delle parti interessate, acquisizione del terreno e test di materiali. Queste attività hanno solitamente un impatto ambientale diretto minore rispetto alle altre fasi del ciclo di vita degli edifici e non apportano contributi rilevanti in termini di kgCO₂eq a meno che non si tratti di grandi progetti infrastrutturali⁷².

4.1.2. EC nella fase di Produzione

L'Impatto ambientale della fase di produzione viene calcolato sommando i moduli A1, A2 e A3, considerando l'estrazione delle risorse, il trasporto al sito di produzione e la realizzazione del semilavorato o prodotto finito. Quindi, l'impatto complessivo è influenzato sia dal tipo di risorsa energetica utilizzata (fossile o rinnovabile) sia dalla natura della materia prima impiegata.

Il calcolo è stato eseguito secondo il metodo avanzato utilizzando il Bill of Quantities (BoQ), considerando che le quantità del progetto siano le stesse pervenute in cantiere.

Per ogni materiale è stata calcolata la quantità totale utilizzata espressa in kg, m³ oppure in m². Successivamente, questo valore è stato moltiplicato per il GWP, ovvero il potenziale di riscaldamento globale specifico per ogni materiale, espresso dalle EPD fornite dai progettisti e sui database open source EPD Italy⁷³ e EPD International⁷⁴.

Il risultato ottenuto è il seguente:

$$EC_{A1-A3} = 4,2E+06 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Per gli step di calcolo dettagliati si rimanda alla sezione Allegati

I principi applicati per il calcolo di A1-A3 sono i seguenti:

- La quantità dei materiali è stata calcolata in base alle piante, sezioni, prospetti e disegni tecnici del progetto preliminare
- Per il calcolo, sono stati utilizzati i valori delle EPD indicate dai progettisti. Ove non presenti, l'EPD presa in considerazione è stata selezionata in base al fattore di emissione specifico risultato come valore medio a fronte del confronto di tre/quattro EPD per lo stesso materiale
- Al fine di uniformare il più possibile le unità di misura per il calcolo, i valori delle

EPD espressi in base all'unità 1ton sono stati riportati all'unità di riferimento 1kg mediante la conversione 1ton=1000kg

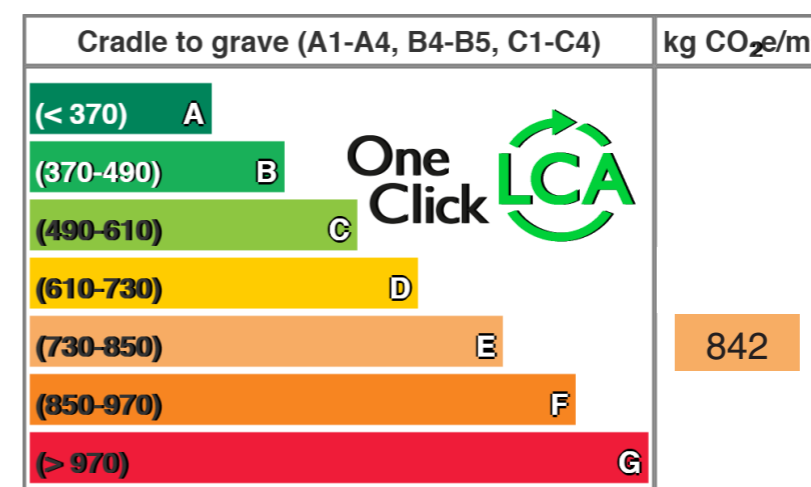
- Per il calcolo dei serramenti sia esterni che interni, vetro e telaio sono stati considerati separatamente facendo riferimento a due EPD diverse con i rispettivi valori. Per le vetrate continue, sono stati utilizzati i valori dell'EPD di progetto, che considerano il serramento completo, includendo sia la componente vetrata sia il telaio in alluminio.
- Per i riferimenti delle EPD utilizzate per ogni materiale e per gli step di calcolo dettagliati, si rimanda alle tabelle riportate nella sezione Allegati.

Tabella 12: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli A1-A3

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
A1-A3	4,2E+06	4,2E+03	8,4E+02 ⁷⁵

75. GIFA: 4.970,11 m²

Il risultato di 8,3E+02 kgCO₂eq/m² indica che l'edificio emette una quantità medio-alta di kgCO₂eq sulla base dello scenario italiano, come viene dimostrato dalla tabella successiva elaborata dal software OneClickLCA utilizzato per il calcolo del Life Cycle Assessment di un manufatto edilizio⁷⁶.



76. Software non impiegato per il calcolo per nessuno dei moduli presente in questo studio

Figura 26: Rielaborazione personale della tabella riassuntiva delle emissioni di OneClickLCA

Invece, nella tabella seguente è possibile confrontare l'impatto dei vari elementi dell'edificio espresso in percentuale. Da ciò si evince che la voce "sottofondazioni e pavimentazioni piano terra" è la più impattante probabilmente per la presenza di grande quantità di calcestruzzo impiegata per magroni e fondazioni.

Tabella 13: Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali

Elementi	kgCO ₂ eq	Impatto [%]
Sottofondazioni e pavimentazioni piano terra	1,8E+06	43,5%
Copertura	9,0E+05	21,6%
Struttura portante	3,2E+05	7,7%
Pavimentazioni piani superiori	2,2E+05	5,4%
Fondazioni	2,0E+05	4,8%
Serramenti esterni	1,8E+05	4,3%
Contropareti e facciate	1,7E+05	4,0%
Partizioni interne	1,5E+05	3,6%
Aree esterne	9,9E+04	2,4%
Serramenti interni	7,1E+04	1,7%
Facciate vetrate esterne	2,3E+04	0,5%
Facciate vetrate interne	2,2E+04	0,5%
Finiture	4,3E+03	0,1%
TOTALE	4,2E+06	100,0%

4.1.3. EC nella fase di Costruzione

Per quanto riguarda la contabilizzazione della fase di costruzione, i due moduli A4 e A5 verranno trattati separatamente poiché molto diversi tra loro.

Nel caso di studio selezionato, non è stato possibile reperire le informazioni specifiche sui mezzi e attrezzature impiegate sia nel trasporto che in cantiere. Per questo motivo entrambi i moduli sono stati calcolati seguendo la modalità di calcolo base.

Per il calcolo del modulo A4, il primo passo è quello di definire la tipologia del mezzo e il carburante che utilizza per ogni materiale impiegato, facendo riferimento alla tabella sottostante. A seconda del tipo di mezzo selezionato, l'impatto può variare considerevolmente. La tabella sottostante indica i mezzi ipotizzati per il caso studio.

Tabella 14: Rielaborazione tabella riferita alle tipologie di mezzi utilizzati nel trasporto da da Andreotti J., Giordano R., 2024

Tipologia di mezzi	Tipologia di carburante	Unità di misura
Autocarro < 7,5 t	Diesel	l/tkm
Autocarro 7,5-12 t	Diesel	l/tkm
Autocarro 12-24 t	Diesel	l/tkm
Autocarro 24-40 t	Diesel	l/tkm

Successivamente, è necessario stabilire se il percorso che il mezzo effettuerà

sarà piano o collinare. Per il caso studio in esame, data la sua localizzazione, si è ipotizzato il percorso pianeggiante prendendo a riferimento i valori riportati nella tabella seguente.

Tabella 15: Rielaborazione tabella riferita alle tipologie di mezzi utilizzati nel trasporto in relazione al consumo del carburante e alla portata massima da Andreotti J., Giordano R., 2024. Dove: A=consumo del carburante del mezzo vuoto; B= differenza tra il veicolo a pieno carico e il veicolo vuoto; C= carico utile massimo del mezzo (portata)

Tipologia di mezzi	A [l/100km]	B [l/100km]	C [ton]
Autocarro < 7,5 t	12,9	1,2	3,5
Autocarro 7,5-12 t	16,6	2,4	6
Autocarro 12-24 t	18,6	2,9	12
Autocarro 24-40 t	21,5	8,2	26

In seguito, sono state definite le distanze di trasporto in base alla tipologia di materiale e prendendo come riferimento i valori della seguente tabella.

Tabella 16: Rielaborazione della tabella inerente agli scenari di trasporto da Andreotti J., Giordano R., 2024

Scenario di trasporto	km (strada)
Produzione locale (es. cemento, laterizi, ecc.)	50
Produzione nazionale (es. cartongesso, isolante, ecc.)	300
Produzione europea (es. moduli di facciata, legnami, ecc.)	1500

Dopo aver eseguito i passaggi precedenti, è possibile calcolare il consumo del mezzo di trasporto. Infine, grazie ai valori della tabella sottostante, è stato possibile definire il valore dell'EC per il modulo A4.

Tabella 17 Rielaborazione tabella riferita al coefficiente di emissione specifica gW in base alla tipologia di carburante da Andreotti J., Giordano R., 2024

Tipologia di carburante	kgCO ₂ eq/l
Diesel	3,43

Successivamente, è possibile mettere a punto lo stesso calcolo in riferimento a tutti i mezzi presi in considerazione in modo da poter confrontare quale di essi abbia l'impatto minore.

In generale si è assunto che il progetto del caso di studio prevede l'impiego di materie prime reperibili a scala locale (50 km) e nazionale (300 km).

Sulla base dei consumi stimati, si ottiene:

$$EC_{A4} = 1,8E+05 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

I principi applicati per il calcolo di A4 sono i seguenti:

- La scelta della portata dell'autocarro è stata effettuata in base all'impatto ambientale più basso, non in base al numero di viaggi. Infatti, quest'ultimo non corrisponde necessariamente ad un minor impatto ambientale. Questo ragionamento è stato applicato al trasporto per ogni materiale impiegato
- Per motivi di localizzazione sono stati esclusi i trasporti via mare, così come quelli su rotaia. Successivamente sono stati esclusi tutti i veicoli elettrici seguendo lo scenario di business as usual. Inoltre, ogni viaggio è calcolato per un percorso pianeggiante sempre a causa della localizzazione e conformazione del sito.

Tabella 17: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo A4

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
A4	1,8E+05	1,8E+02	3,7E+01 ⁷⁷

77. GIFA: 4.970,11 m²

Tabella 18: Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali

Elementi	kgCO ₂ eq	Impatto [%]
Sottofondazioni e pavimentazioni piano terra	6,0E+04	32,7%
Aree esterne	4,4E+04	24,4%
Struttura portante	3,1E+04	17,1%
Copertura	2,0E+04	10,8%
Contropareti e facciate	1,1E+04	5,8%
Partizioni interne	5,7E+03	3,1%
Fondazioni	5,2E+03	2,9%
Facciate vetrate esterne	5,7E+02	0,3%
Facciate vetrate interne	2,0E+03	1,1%
Serramenti esterni	1,3E+03	0,7%
Pavimentazioni piani superiori	8,7E+02	0,5%
Serramenti interni	8,3E+02	0,5%
Finiture	5,7E+02	0,3%
TOTALE	1,8E+05	100,0%

Invece, per quanto riguarda la fase A5 si valutano le emissioni derivanti da tutte le attività di cantiere, eseguite con mezzi specifici.

Come primo step, sono stati stimati i mezzi pesanti utilizzati per la posa in opera e la movimentazione dei vari materiali del progetto. La scelta dei mezzi è stata effettuata tramite la seguente tabella dove sono riportati i dati da SCAB (South Coast Air Basin fleet average emission factors)⁴⁹ ai fattori di emissioni specifica.

Tabella 19: Mezzi utilizzati in cantiere con le relative emissioni di CO₂, CH₄ e la loro portata oraria

Mezzi	CO ₂ [lb/hr]	CH ₄ [lb/hr]	Portata [kg/h]
Miscelatori cemento/malta	7,2	0,001	134400
Gru	128,6	0,006	12000
Trattori cingolati	114,0	0,007	1440000
Carrelli elevatori	54,4	0,002	150000
Escavatori	119,6	0,005	580000
Camion	260,1	0,010	150000
Pompe	49,6	0,002	120000
Rulli	67,0	0,004	1500000
Bulldozer	239,1	0,015	1440000
Pale gommate	108,6	0,005	414000

Invece, per i dati relativi alla portata dei mezzi calcolata in kg/h, è stato necessario avvalersi dell'intelligenza artificiale mediante ChatGPT, poichè non sono presenti dati a riguardo nelle EPD dei materiali e nemmeno tra la documentazione del cantiere. Sulla base dei calcoli eseguiti, si ottiene:

$$EC_{A5} = 2,4E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

I principi applicati per il calcolo di A5 sono i seguenti:

- Per il calcolo della fase A5 sono stati presi in considerazione solo i mezzi a diesel impiegati nelle operazioni di costruzione, movimentazione dei materiali e preparazione del terreno. Dunque, vengono esclusi i mezzi per la costruzione e il montaggio di elementi leggeri e gli strumenti ad alimentazione elettrica.
- I valori della portata portata oraria dei mezzi da costruzione impiegati, sono stati calcolati mediante l'uso dell'intelligenza artificiale (ChatGPT) ed espressi in kg/h.

Tabella 20: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo A5

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
A5	2,4E+04	2,4E+01	4,8E+00 ⁷⁸

78. GIFA: 4.970,11 m²

Tabella 21: Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali

Elementi	kgCO ₂ eq	Impatto [%]
Struttura portante	9,0E+03	37,7%
Aree esterne	5,8E+03	24,3%
Contropareti e facciate	2,3E+03	9,5%
Sottofondazioni e pavimentazioni piano terra	1,9E+03	7,8%
Partizioni interne	1,6E+03	6,7%
Pavimentazioni piani superiori	1,3E+03	5,6%
Copertura	7,5E+02	3,1%
Facciate vetrate interne	5,6E+02	2,3%
Fondazioni	3,7E+02	1,6%
Serramenti esterni	1,4E+02	0,6%
Facciate vetrate esterne	6,6E+01	0,3%
Serramenti interni	6,2E+01	0,3%
Finiture	5,8E+01	0,2%
TOTALE	2,4E+04	100,0%

La somma di entrambe le fasi ha un totale di:

$$EC_{A4-A5} = 2,3E+05 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

In totale, la fase A ammonta a:

$$EC_{A1-A5} = 9,8E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 22: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli A1-A5

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
A1-A5	4,4E+06	4,4E+03	8,8E+02 ⁷⁹

4.1.4. EC nella fase di Uso: modulo di Sostituzione

Il calcolo di questo modulo (B4) è stato eseguito con il metodo base ipotizzando i cicli di sostituzione di materiali e/o componenti durante la vita utile dell'edificio, ovvero il numero di volte che si prevede di sostituire un elemento non strutturale

durante lo scenario temporale di riferimento di 50 anni.

Tabella 23: Durata degli elementi e dei materiali del progetto

Elementi e materiali	Durata [anni]
Struttura portante	50
Fondazioni	50
Pannelli prefabbricati in calcestruzzo	50
Pannelli sandwich	40
Isolante esterno	50
Membrana impermeabile	25
Pannelli cartongesso	35
Orditura metallica	50
Isolante interno	35
Piastrelle	30
Pitture	10
Finiture pavimento magazzino	40
Serramenti e lucernari	35
Pavimentazione esterna	40

Il valore totale riferito a questo modulo é:

$$EC_{B4} = 8,9E+05 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 24: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B4

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
B4	8,5E+05	8,5E+02	1,8E+02 ⁸⁰

80. GIFA: 4.970,11 m²

Tabella 25: Incidenza di ciascun elemento sulle emissioni totali

Elementi	kgCO ₂ eq	Impatto [%]
Pavimentazioni piani superiori	2,3E+05	26,7%
Serramenti esterni	1,4E+05	16,9%
Contropareti e facciate	1,4E+05	16,0%
Partizioni interne	1,1E+05	12,6%
Aree esterne	8,9E+04	10,5%
Serramenti interni	5,9E+04	6,9%
Copertura	5,5E+04	6,5%
Sottofondazioni e pavimentazioni piano terra	2,6E+04	3,1%
Finiture	4,4E+03	0,5%

79. GIFA: 4.970,11 m²

Facciate vetrate esterne	6,4E+02	0,1%
Facciate vetrate interne	1,1E+03	0,1%
Struttura portante	0,0E+00	0,0%
Fondazioni	0,0E+00	0,0%
TOTALE	8,5E+05	100,0%

4.1.5. EC di Impianti e Servizi

Si fa riferimento agli elementi inclusi nella classe delle unità tecnologiche, identificata come Impianti di fornitura servizi. Questa categoria comprende, ad esempio, sistemi di climatizzazione, ventilazione meccanica controllata e produzione locale di energia rinnovabile. Alcuni studi evidenziano come gli impianti e i servizi possano contribuire dal 2% al 27% delle emissioni di carbonio nei nuovi edifici (Bagenal G.C., Hamot L., Levey R., Understanding the importance of Whole Life Carbon in the selection of heat-generation equipment, 2019). In caso di ristrutturazioni, invece, il loro contributo all'EC totale può arrivare al 75% (Hamot L., Getting to grips with whole-life carbon, 2019)⁸¹. È fondamentale prestare attenzione ai gas refrigeranti, utilizzati nei sistemi di riscaldamento e raffrescamento, poiché possono incidere significativamente sulle emissioni di gas serra generate dagli impianti.

La metodologia per calcolare le emissioni legate agli impianti è definita in conformità con i principali riferimenti normativi e tecnici, come la UNI EN 15978:2011 e il rapporto tecnico TM65, sempre organizzata in fasi del ciclo di vita (A-C)⁸³.

Ad oggi questa fase è di difficile valutazione in quanto non si dispone di sufficienti informazioni dai produttori. Non è stata valutata per il caso studio selezionato.

4.1.6. OC nella fase di Uso: moduli di operational energy e operational water

La normativa italiana prevede l'obbligo di calcolare il fabbisogno energetico dell'edificio, necessario per l'uso di energia termica ed elettrica per il suo funzionamento, e dichiararlo tramite Attestato di Prestazione Energetica (APE). Questo quantitativo di energia, se moltiplicato per specifici fattori di emissione, restituisce il valore di operational carbon, ovvero le emissioni di carbonio operativo legato al funzionamento dell'edificio. In questo caso, l'APE è stato ottenuto dalla simulazione energetica mediante software Edilclima, trattandosi di un edificio non a destinazione d'uso residenziale oltre ai fabbisogni energetici legati agli impianti di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione meccanica e illuminazione interna sono stati considerati anche i potenziali fabbisogni dell'illuminazione delle aree

interne non riscaldate e quelli per il funzionamento di apparecchiature e dispositivi non contemplati quali ascensori e montacarichi.



Figura 27: Scenario di configurazione impianto fotovoltaico per l'applicazione della metodologia di calcolo. Rielaborazione riferita al caso di studio tratta da Andreotti J., Giordano R., Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024. Rielaborazione personale

Per il calcolo della fase d'uso B6 non si è considerato il contributo del surplus energetico prodotto dall'impianto fotovoltaico, ma solamente il fabbisogno energetico complessivo scorporando la quota coperta da produzione propria di energia elettrica e quella impiegata dal servizio elettrico nazionale. È possibile effettuare il calcolo secondo uno scenario in cui si assume un fattore di emissione costante che considera immutati i processi di produzione dell'energia elettrica a partire dall'anno di realizzazione del manufatto e per tutto il periodo di tempo assunto come riferimento oppure considerando dei fattori di emissione variabili se si considera un progressivo aumento della quota di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

81. Andreotti J., Giordano R., 2024, p.135

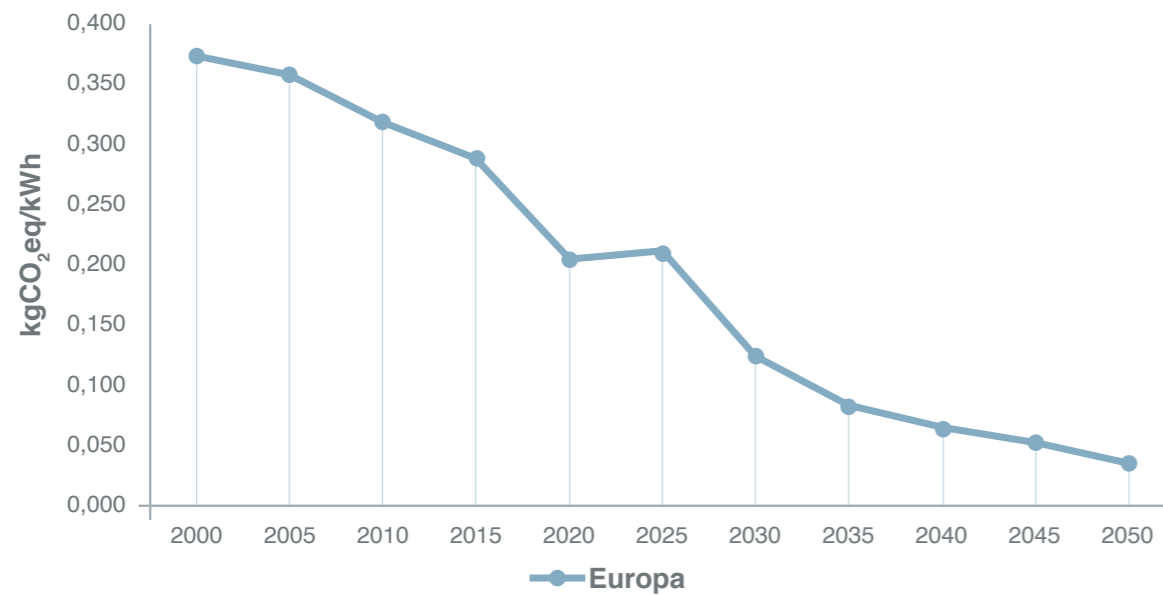


Figura 28: Scenario di decarbonizzazione della produzione di energia elettrica in Europa, tratto da pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Andreotti J., Giordano R., p. 99

In entrambi i casi, si assume che il fabbisogno energetico e la quota di energia elettrica generata dall'impianto rimangano invariati durante l'intero periodo di riferimento, escludendo quindi eventuali variazioni dovute a fattori meteorologici o al calo di efficienza legato all'usura del sistema produttivo⁸².

82. Andreotti J., Giordano R., 2024, pp.98-100

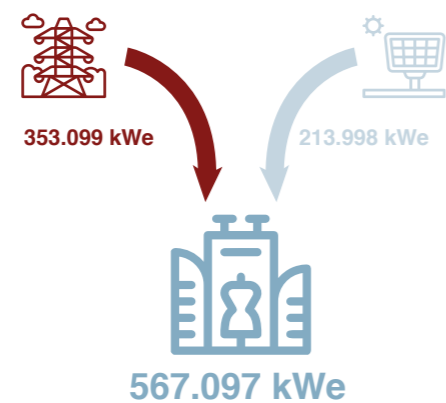


Figura 29: Schema approvvigionamento energia elettrica in relazione al fabbisogno energetico dell'edificio.

Uso con fattore di emissione riferiti allo scenario costante

Per lo scenario con il mix energetico italiano costante, considerando i fattori di emissione riportati nella Tabella 8.4 Fattori di emissione per tipologia di risorsa energetica impiegata tratta dalla pubblicazione di Andreotti J., Giordano R., 2024 di Andreotti J., Giordano R., l' OC_{B6} risulta il seguente:

$$OC_{B6, sf} = 1,0E+05 \text{ kgCO}_2\text{eq/anno}$$

Tabella 26: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B6_{SF}

	kgCO ₂ eq/anno	tonCO ₂ eq/anno	(kgCO ₂ eq/anno)/m ²
B6 _{SF}	1,5E+05	1,5E+05	2,1E+01 ⁸³

83. GIFA: 4.970,11 m²

Per i calcoli dettagliati si rimanda alla Tabella 9 Calcolo OC_{B6} specifica per il singolo servizio energetico previsto in scenario costante contenuta nella sezione Allegati di questo documento.

4.1.7.2. Uso B6 scenario variabile

Nello scenario con il mix energetico italiano variabile, orientato ad una produzione dell'energia elettrica basata sempre più su fonti rinnovabili, il fattore di emissione da considerare cambia sulla base del periodo di riferimento rispetto al ciclo di vita utile dell'edificio. Nel caso preso in esame, si è considerato l'orizzonte temporale dal 2025 al 2075 e i rispettivi valori sono riportati nella Tabella B8.1 Fattore di emissione per il periodo di riferimento dal 2025 al 2075 tratta dalla pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Andreotti J., Giordano R., integrata considerando gli anni successivi al 2050.

Tabella 27: Stima fattori di emissione per anni successivi al 2050

Anno	f_{GHG} [kgCO ₂ eq/kWh]
2025	0,293
2030	0,175
2040	0,089
2050	0,048
2060	0,034
2070	0,021
2080	0,012

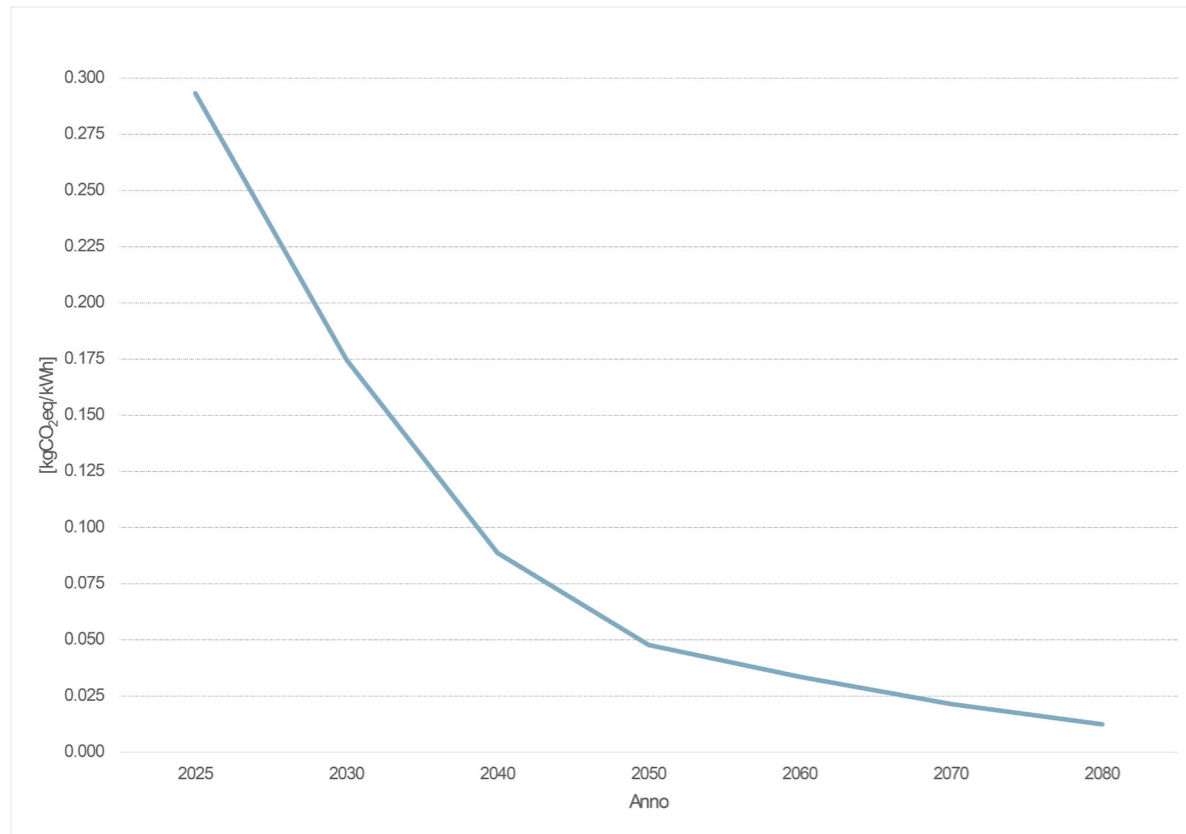


Figura 30: Schema approvvigionamento energia elettrica in relazione al fabbisogno energetico dell'edificio.

In base a ciò, l'OC_{B6} risulta il seguente:

$$OC_{B6,sv} = 2,4E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq/anno}$$

Tabella 28: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B6_{sv}

	kgCO ₂ eq/anno	tonCO ₂ eq/anno	(kgCO ₂ eq/anno)/m ²
B6 _{sv}	2,4E+04	2,4E+01	4,8E+00 ⁸⁴

84. GIFA: 4.970,11 m²

Per i calcoli dettagliati si rimanda alla Tabella 11 Calcolo OC_{B6} specifica per il singolo servizio energetico previsto in scenario variabile contenuta nella sezione Allegati di questo documento.

Uso Operational Water

Gli affollamenti previsti per gli ambienti sono all'interno della Tabella 8.5 Riferimenti l/persona giorno acqua chiara per destinazione d'uso tratta dalla pubblicazione Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life

Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Giordano e Andreotti. In base a ciò, l'OC_{B7} risulta il seguente:

$$OC_{B7} = 1,6E+03 \text{ kgCO}_2\text{eq/anno}$$

Tabella 29: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo B7

	kgCO ₂ eq/anno	tonCO ₂ eq/anno	(kgCO ₂ eq/anno)/m ²
B7	1,63E+03	1,6E+00	3,8E-01 ⁸⁵

85. GIFA: 4.970,11 m²

4.1.7. EC nella fase di fine vita

Gli impatti a fine vita vengono valutati ipotizzando degli scenari di demolizione e smaltimento del manufatto al termine della sua fase operativa. Secondo lo standard UNI EN 15978:2011, questa fase include quattro moduli principali: Demolizione (C1), Trasporto dei rifiuti (C2), Trattamento dei rifiuti (C3) e Smaltimento finale (C4).

Nel modulo C1, si devono contabilizzare le emissioni derivanti dai processi di demolizione. Essi, tuttavia, possono essere già presenti in altre fasi del ciclo di vita di un edificio, da quelle preliminari di costruzione (A5) alle operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria (B2/B5). Il risultato finale (EC C1) va quindi inteso come la somma dei diversi contributi EC per tutti i moduli che prevedono demolizioni. In base a ciò, l'EC_{C1} risulta il seguente:

$$EC_{C1} = 2,4E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 30: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo C1

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
C1	2,4E+04	2,4E+01	4,8E+00 ⁸⁶

86. GIFA: 4.970,11 m²

Il modulo C2 tiene conto delle emissioni generate dal trasporto dei rifiuti verso il sito di trattamento o smaltimento finale. Questi rifiuti comprendono i materiali e i prodotti effettivamente utilizzati per realizzare il manufatto edilizio dal momento in cui non sono più in grado di svolgere le funzioni per le quali sono stati impiegati inizialmente.

Nello studio si è effettuata una ricerca delle principali discariche e centri di trattamento rifiuti presenti sul territorio.

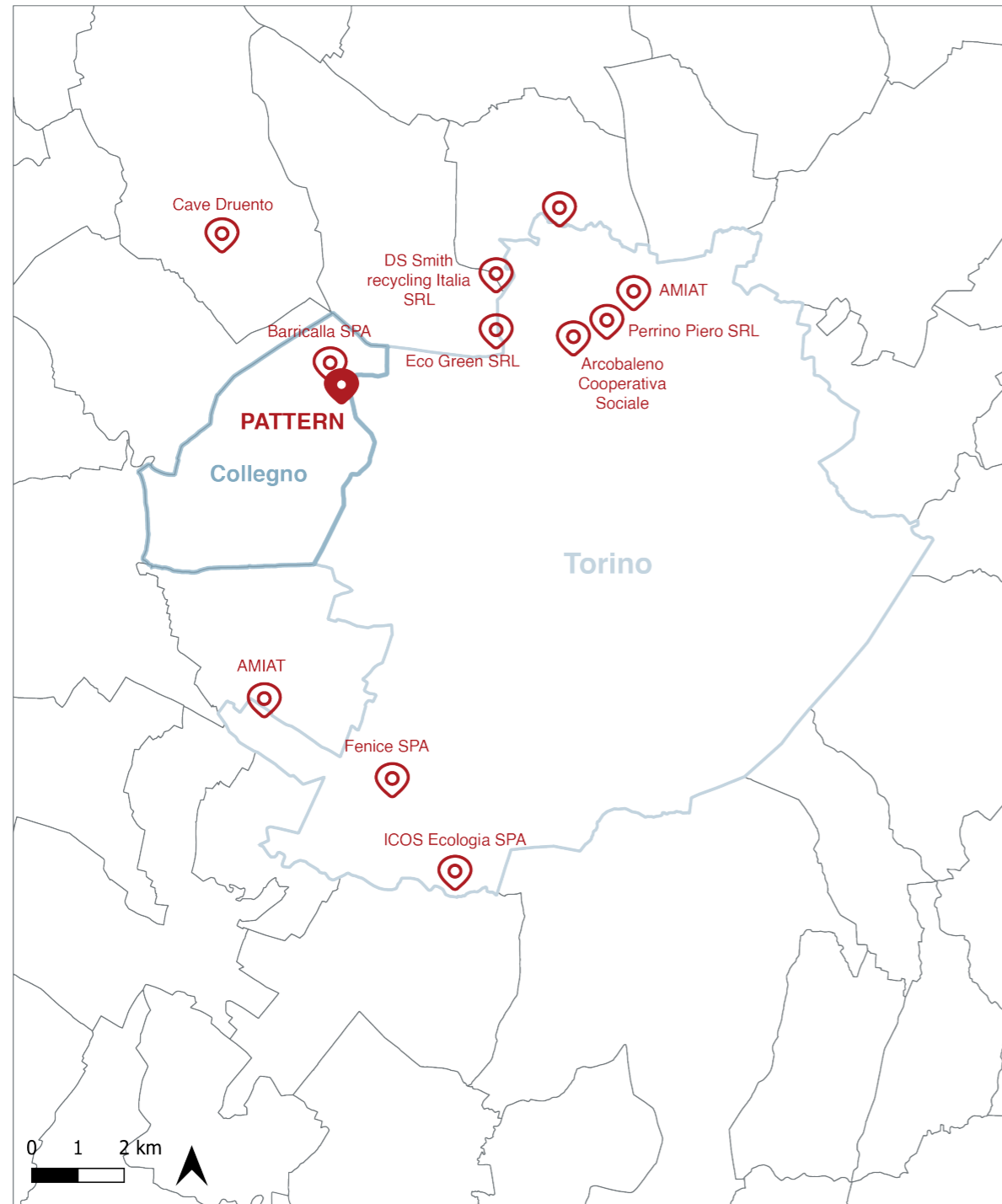


Figura 31: Mappatura dei luoghi di conferimento dei rifiuti

Considerando la distanza dal sito di cantiere del caso di studio sono state assunte le seguenti distanze medie:

- Per il trasporto di rifiuti destinati a discarica 15 km;
- Per il trasporto di rifiuti destinati a centri di trattamento rifiuti 20 km

Qualora non siano dati noti, la distanza raccomandata da considerare nel calcolo è di 50 km. Per i valori dei consumi del carburante e per la tipologia dei mezzi utilizzati, si fa riferimento alla *Tabella 14* e alla *Tabella 15*.

Ottenendo un totale di

$$EC_{C2} = 5,7E+03 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 31: Risultati del calcolo delle emissioni relative al modulo C2

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
C2	5,7E+03	5,7E+00	1,1E+00 ⁸⁷

87. GIFA: 4.970,11 m²

Per li moduli C3 e C4, si definiscono le modalità di trattamento e smaltimento dei rifiuti derivanti dalla demolizione del manufatto edilizio. A tal proposito nella pubblicazione sono illustrati due possibili scenari:

- conferimento del 100% dei rifiuti in discarica;
- conferimento del 30% dei rifiuti in discarica, mentre il restante 70% è destinato al riciclo⁸⁸

88. Andreotti J., Giordano R., 2024, pp. 107-108

A fronte di ciò, si è scelto di prendere in considerazione il secondo scenario per la maggior parte dei materiali impiegati nel progetto. Di seguito sono riportati i materiali per cui, a causa della natura delle loro componenti o dell'assemblaggio delle parti, si è scelto di adottare il primo scenario:

- Pannelli sandwich — non sempre è possibile separare correttamente la componente in acciaio da quella isolante, ma qualora lo fosse essendo composta da poliuretano l'unica opzione possibile per questo materiale sarebbe la termovalorizzazione, processo descritto nel paragrafo seguente e che purtroppo comporta la produzione di quantità di CO₂⁸⁹;
- Porte interne — essendo di legno tamburato si considera che al termine del periodo di riferimento dell'analisi queste siano in condizioni tali da non poter essere recuperate, quindi destinate a discarica e si tratta di rifiuti speciali.

89. Guolo E., Cappelletti F., Romagnoni P., Raggiotto F., Impatti ambientali dei pannelli in poliuretano, https://www.stiferite.com/pdf/Libri/Impatti_ambientali_dei_pannelli_in_poliuretano_espanso_rigido.pdf, visionato il 15/04/2025

Tabella 32: Calcolo emissioni CO2 equivalente dei materiali destinati a discarica

Tipologia di rifiuti	Quantità a discarica (ton)	F _{em} trattamento tonCO ₂ eq	Emissioni totali kgCO ₂ eq
Pannelli sandwich	22.74	0.00	28.06
Legno	5.16	0.01	46.00
Totale			74.07

Gli altri materiali impiegati nel progetto sono stati ricondotti alle macro-categorie contenute nella pubblicazione e si è effettuata una ricerca sulle possibilità di riciclo di ciascuno di essi, escludendo il riuso per quasi tutte le voci in quanto per poterli reimpiegare è necessario passare per dei processi di trasformazione, eccezion fatta per il terreno e gli aggregati. In generale si configurano due tipologie di riciclo, Open-loop quando il rifiuto viene destinato a processi differenti da quello che lo ha generato e Closed-loop se il rifiuto viene sottoposto a un processo di riciclaggio analogo a quello che lo ha generato⁹⁰.

90. Andreotti J., Giordano R., 2024, pp.107-108

Tabella 33: Tabella per il calcolo dei moduli C3-C4

Tipologia di rifiuto	Scenario 2 (70-30)				Tipologia di trattamento dei rifiuti
	Quantità (ton)	Tasso di recupero	Quantità recuperata	Quantità a discarica	
Cartongesso	319,0	70,00	223,3	95,7	Closed-loop recycling
Gomma/plastica	21,8	70,00	15,2	6,5	Closed-loop recycling
Isolanti	71,9	70,00	50,3	21,6	Closed-loop recycling
Pannelli sandwich	22,7	0,00	0,0	22,7	Discarica
Legno	5,2	0,00	0,0	5,2	Discarica
Mattoni/Laterizi	0,4	70,00	0,0	0,4	Open-loop recycling
Metalli	263,2	70,00	184,2	79,0	Closed-loop recycling
Vetro	87,1	70,00	61,0	26,1	Open-loop recycling

Per un totale di

$$EC_{C3-C4} = 6,8E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 34: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli C3-C4

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
C3-C4	6,8E+04	6,8E+01	1,4E+01 ⁹¹

91. GIFA: 4.970,11 m²

Analizzando nel dettaglio ciascuna voce:

- Calcestruzzo — Open loop

A seguito di processi di frantumazione e separazione è possibile riutilizzare gli aggregati riciclati come base stradale, nella produzione di nuovo calcestruzzo o per altri scopi costruttivi come riempimenti e coperture di terreni⁹².

- Cartongesso e fibrogesso — Closed loop

Il cartongesso deve essere separato da eventuali parti in carta e componenti metallici, le lastre di gesso vengono tritate fino ad ottenere una polvere di gesso fine che viene fatta passare in dei particolari filtri per rimuovere eventuali impurità, successivamente viene sottoposto a un trattamento termico. La nuova polvere ottenuta può essere reimpiegata per la produzione di nuovi pannelli per pareti e soffitti in gesso riciclato.

- Gomma/plastica — Closed loop

In questa categoria sono stati inclusi principalmente i teli impiegati per le barriere e freni al vapore. Questi sono considerati riciclabili se composti da tessuto non tessuto⁹³ o polipropilene⁹⁴.

- Isolanti — Closed loop

Sono 100% riciclabili, i pannelli vengono smontati per poi essere tritati e si ottengono di nuovo fibre di piccole dimensioni che con opportune colle possono essere riassemblate sotto forma di pannelli ed essere impiegati nuovamente come isolamento⁹⁵.

- Mattoni/Laterizi — Open loop

Vengono puliti, poi sottoposti a un processo di triturazione per ridurli in frammenti piccoli da impiegare poi nella produzione di nuovi laterizi. Il prodotto riciclato viene mescolato con sabbia, argilla e leganti per creare la nuova miscela da cui ottenere i mattoni⁹⁶.

- Metalli — Closed loop

Gli elementi metallici sono principalmente in acciaio che può essere riportato al punto di fusione e reimpiegato nella produzione di nuovi componenti⁹⁷.

- Terreni — Closed loop

Il terreno impiegato per il tetto verde può essere riutilizzato come

92. Recupero Zaminga, Riciclo del calcestruzzo: come riciclare il calcestruzzo e i suoi benefici, 2024, <https://www.zamingarecuperi.it/riciclo-del-calcestruzzo-come-e-i-suoi-benefici/>, visionato il 16/04/2025

93. Pratrivero nonwovens, Tessuto non tessuto: come si ricicla?, <https://www.pratrivero.com/come-riciclare-tnl/>, visionato il 16/04/2025

94. Waste trade, Riciclaggio del polipropilene (PP) <https://www.wastetrade.com/it/resources/introduction-to-plastics/types-of-plastics/polypropylene-pp/> visionato il 16/04/2025

95. Mil-tek, Riciclaggio di lana di roccia, lana minerale e lana di vetro <https://www.miltek.it/tipologia-dei-rifiuti/isolanti/>, visionato il 16/04/2025

96. CantieriEdili, I benefici del riciclo dei mattoni nella produzione di nuovi laterizi <https://www.cantieriedili.net/blog/i-benefici-del-riciclo-dei-mattoni-nella-produzione-di-nuovi-laterizi/>, visionato il 16/04/2025

97. Waste Trade, Vantaggi del riciclo dei metalli, <https://www.wastetrade.com/it/resources/benefits-of-recycling-metals/>, visionato il 16/04/2025

riempimento in altri contesti.

- Vetro — Closed loop o Open

Può essere riciclato sia reimpiegandolo per produrre di nuovo vetro che utilizzato in diverse applicazioni edilizie quali la produzione di mattoni, pannelli decorativi o isolanti in lana di vetro, ma si può anche impiegare per realizzare decorazioni murali e complementi d'arredo di design per interni e per esterni⁹⁸.

98. Vetreria Valmarecchia, Vetro e sostenibilità ambientale: un connubio perfetto per il futuro, <https://www.vetrieriavalmarecchia.it/vetro-e-sostenibilita-ambientale-un-connubio-perfetto-per-il-futuro/>, visionato il 15/04/2025

In totale, la fase C ammonta a:

$$EC_{C1-C4} = 9,8E+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Tabella 35: Risultati del calcolo delle emissioni relative ai moduli C1-C4

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
C1-C4	9,8E+04	9,8E+01	2,0E+01 ⁹⁹

99. GIFA: 4.970,11 m²

4.2. Risultati Whole Life Carbon e Circular Economy

Sull'intero ciclo di vita dell'edificio, l'impatto complessivo ammonta a 9.395,60 tonnellate di CO₂ equivalente. Considerando le singole fasi che è stato possibile calcolare dell'intero ciclo di vita, si sono confrontati i risultati di ciascuna, evidenziando a quali di esse fosse attribuibile una maggiore quantità di emissioni. In questo modo è stato possibile ragionare su quali possano essere le differenze significative e le possibili azioni correttive per ottimizzare il bilancio complessivo di carbonio.

Figura 32: Emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario fisso e incidenza sul totale

Moduli	tonCO ₂ eq	Impatto [%]
A1-A3	4,2E+03	44,5%
A4	1,8E+02	1,9%
A5	2,4E+01	0,3%
B4	8,9E+02	9,5%
B6	3,9E+03	41,9%
B7	8,2E+01	0,9%
C1	2,4E+01	0,3%

C2	5,7E+00	0,1%
C3-C4	6,8E+01	0,7%
TOTALE	9,4E+03	100,0%

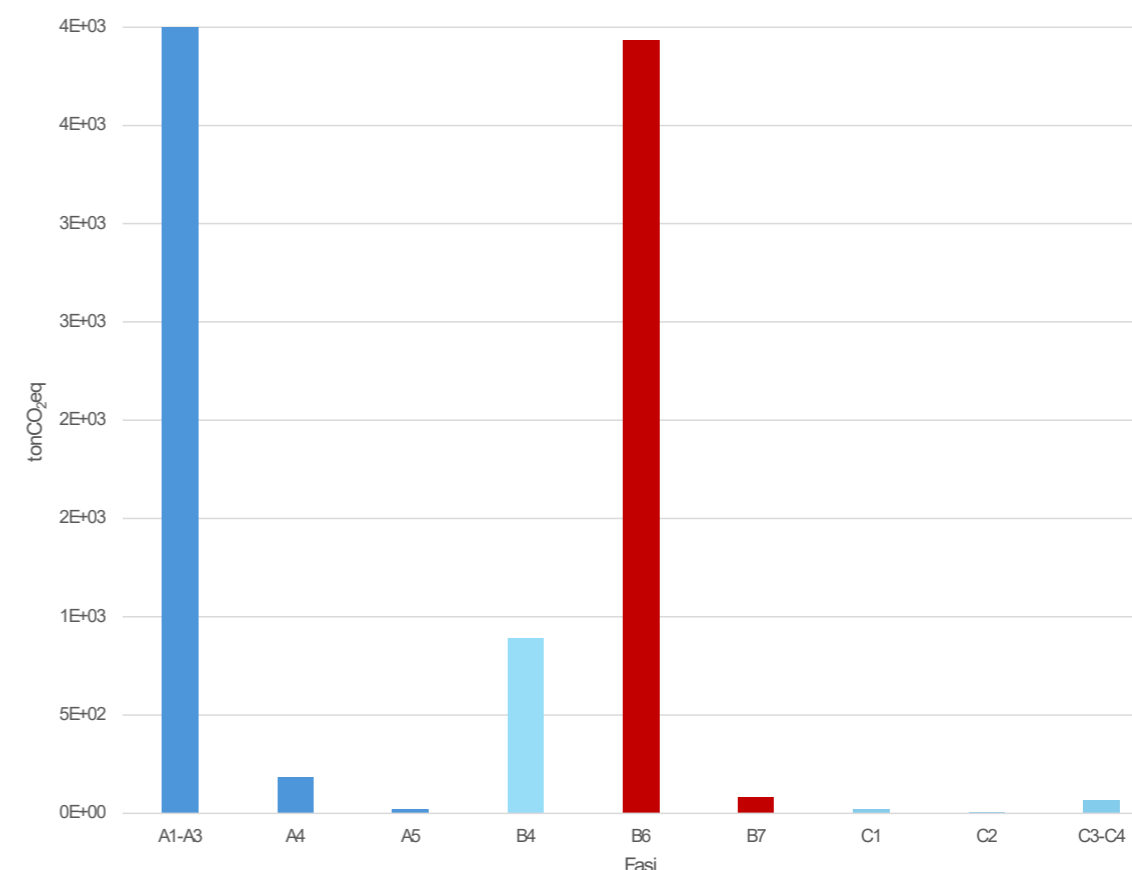


Figura 33: Totale emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario fisso

Dal grafico qui sopra riportato si evince che le fasi più impattanti siano la A1-A3, legata alla tipologia di materiali impiegati nella realizzazione, la B4 correlata alle sostituzioni dei componenti a seguito di usura o manutenzione e la B6 relativa alle emissioni riferite all'uso dell'edificio, infine la C3-C4 riferita ai processi di trattamento per poter riciclare o destinare a discarica i rifiuti prodotti dalla demolizione del fabbricato a fine vita.

A livello nazionale non sono presenti target a cui far riferimento per poter confrontare edifici della stessa tipologia sulla base delle emissioni prodotte. Dunque, per poter classificare il caso studio, è stato necessario far riferimento ai target messi in atto nel Regno Unito presenti nel documento Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon di LETI per la valutazione dell'EC¹⁰⁰.

All'interno del documento sono presenti i target per diverse tipologie di edifici quali

100. LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon <https://www.leti.uk/carbonalignment>, visionato il 10/06/2025. Approfondimento di: LETI, LETI Embodied Carbon Primer, 2020

uffici, abitazioni con un minimo di sei piani, edifici per l'educazione e commerciali. Ai fini della classificazione di Pattern HQ, dal momento che non è presente la categoria degli edifici industriali, sono stati presi a riferimento i valori per gli uffici; dal momento che ne è presente una parte consistente. Inoltre, gli standard per questa categoria sono più stringenti rispetto alle altre città poc'anzi. Le tabelle sottostante mostra i target sia per la fase A1-A5 che per la somma dell'intero EC dell'edificio (A1-A5, B1-B5, C1-C4).

Tabella 36: Target per l'EC iniziale, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon

Iniziale EC A1-A5	
Band	Office
A++	<150
A+	<225
A	<350
B	<475
C	<600
D	<775
E	<950
F	<1100
G	<1300

Tabella 37: Target per il Life Cycle EC, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon

Life Cycle EC A1-A5, B1-B5, C1-C4	
Band	Office
A++	<150
A+	<345
A	<530
B	<750
C	<970
D	<1180
E	<1400
F	<1625
G	<1900

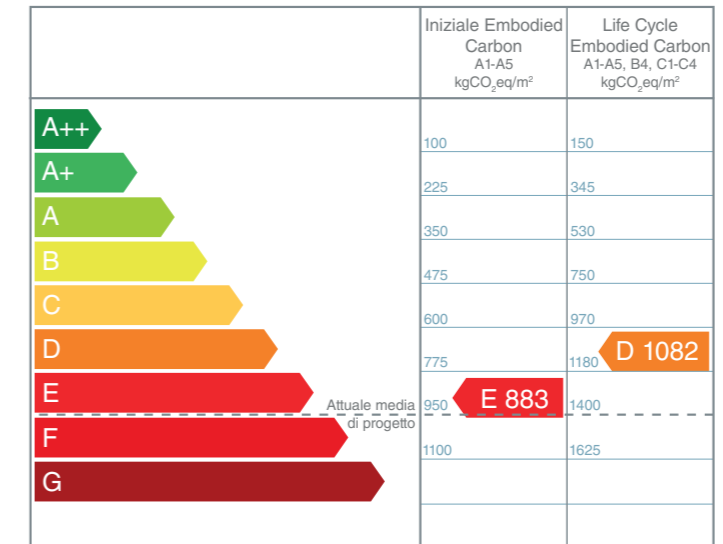
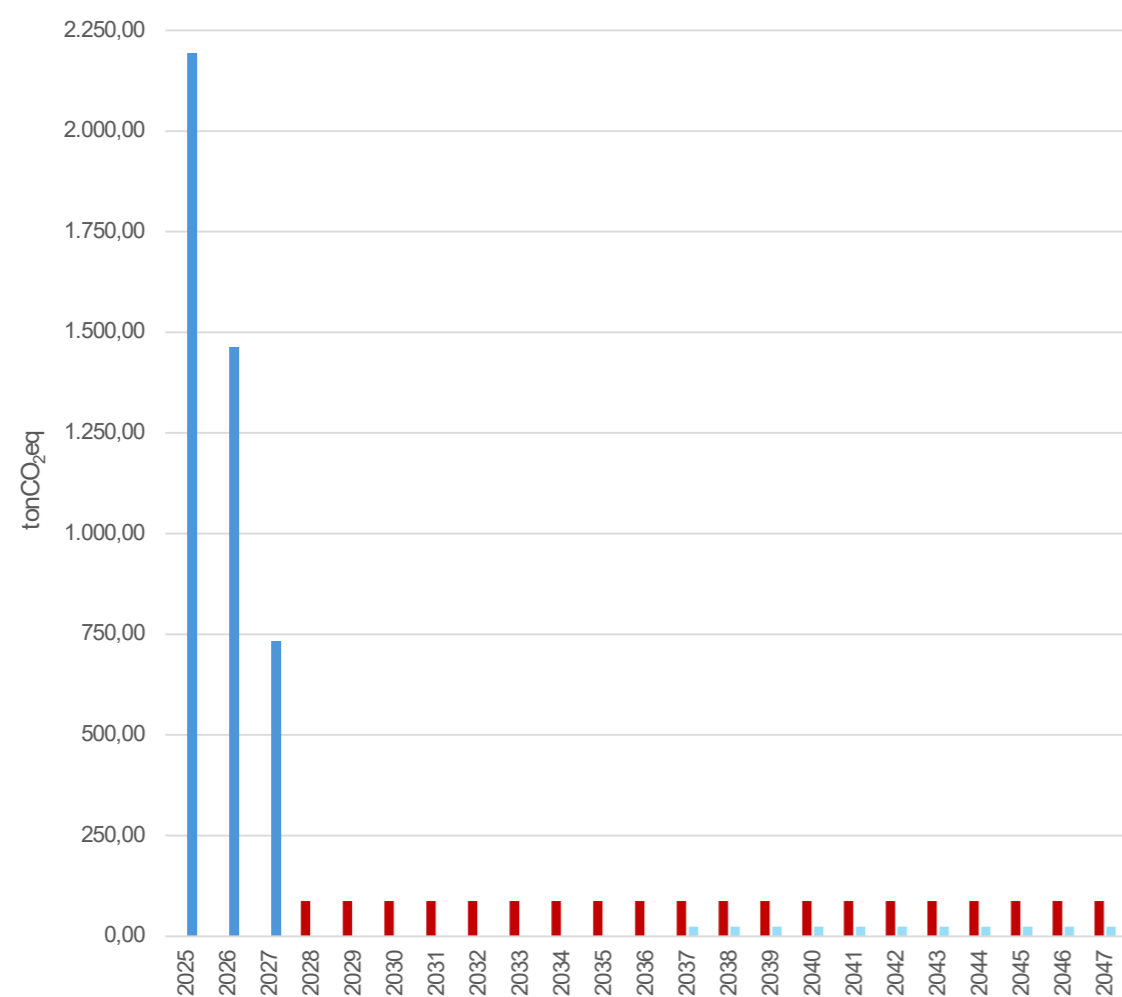


Figura 34: Classificazione delle emissioni di Pattern HQ in base all'EC, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon

Il grafico sottostante riassume le emissioni di EC e OC in 50 anni per i moduli considerati in questo studio. In particolare, l'EC per i moduli A1-A3 è stato ripartito proporzionalmente: il primo anno rappresenta il 50% del totale (3/6), il secondo il 33% (2/6) e il terzo il 17% (1/6). Successivamente, le emissioni per il modulo B4 sono state ripartite uniformemente per i 38 anni in cui sono state ipotizzate le operazioni di sostituzione. Per quanto riguarda i moduli C1-C4, le emissioni di EC sono concentrate esclusivamente nel cinquantesimo anno, corrispondente alla fase di fine vita. Infine l'OC è ripartito uniformemente per 46 anni (scenario fisso), escludendo i primi tre anni di costruzione e l'ultimo anno di dismissione.



- EC moduli A1-A3
- EC moduli B4, C1-C4
- OC moduli B6, B7

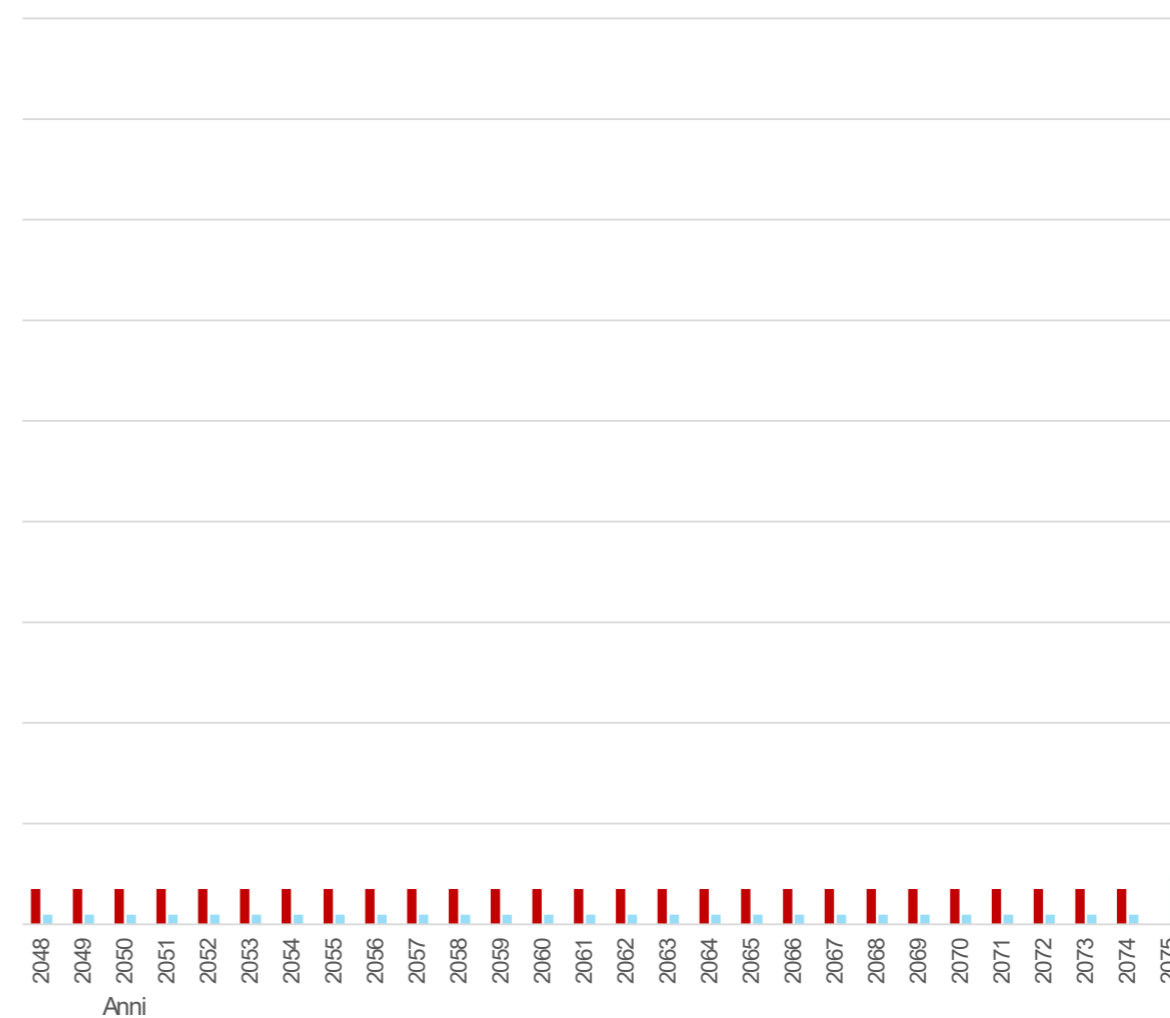


Figura 35: Emissioni di EC e OC in 50 anni secondo lo stato attuale del progetto

5. Soluzioni di compensazione e decarbonizzazione applicabili al caso di studio

In questo capitolo vengono illustrate le strategie di decarbonizzazione elaborate sulla base delle analisi presentate nel capitolo precedente. Identificati i moduli con il maggiore impatto ambientale, sono state definite azioni mirate che dimostrano come sia possibile ridurre in modo efficace l'impronta carbonica dell'ambiente costruito, promuovendo una transizione concreta verso edifici a basse emissioni. Completata la definizione di tali strategie, si possono quindi attuare misure di compensazione, fondamentali per il raggiungimento della neutralità climatica, obiettivo previsto entro il 2050 dalla road map italiana per la decarbonizzazione.

5.1. Soluzione di decarbonizzazione per i moduli A1-A3 e B4

Per ridurre l'impatto ambientale è possibile intervenire fin dalle prime fasi progettuali, valutando attentamente se tutti i volumi previsti siano realmente necessari per le attività previste. È inoltre fondamentale analizzare le scelte relative alla conformazione dell'involucro edilizio, distinguendo con attenzione le porzioni da realizzare in vetro da quelle con tamponature opache, al fine di minimizzare le dispersioni termiche.

Una volta ottimizzato il progetto, il passo successivo consiste nella sostituzione dei materiali previsti, scegliendo alternative a minore impatto ambientale. A tal proposito è stata effettuata un'analisi su quali materiali siano maggiormente responsabili della CO₂ emessadi cui la Tabella 35 riassume i risultati.

Tabella 38: Emissioni dei materiali di progetto in ordine decrescente dal più impattante

Elementi e materiali	kgCO ₂ eq	Impatto [%]
Calcestruzzo	3,3E+06	79,5%
Alluminio	2,8E+05	6,7%
Pavimentazioni	1,3E+05	3,0%
Acciaio	1,1E+05	2,7%
Cartongesso	1,1E+05	2,7%
Pannelli sandwich	7,5E+04	1,8%
Facciata continua	4,5E+04	1,1%
Impermeabilizzazioni	4,5E+04	1,1%
Isolanti	3,0E+04	0,7%
Sottofondazioni	2,2E+04	0,5%
Legno	7,5E+03	0,2%

Lucernari	3,1E+03	0,1%
Tetto verde	8,3E+02	0,0%
Intonaci	3,0E+02	0,0%
Vetro	1,7E+02	0,0%
TOTALE	4,2E+06	100,0%

Il materiale più impattante di tutti, con un'incidenza dell'80% circa, è risultato il calcestruzzo. Infatti, il calcestruzzo è presente sia come getto in opera per la realizzazione delle fondazioni, sia in forma prefabbricata per la struttura portante del piano terra. Il secondo materiale, in termini di impatti generati, è l'alluminio con un'incidenza superiore al 6%. Questo materiale è presente sottoforma di profili che vanno a costituire le parti finestrate dell'edificio, sia interne che esterne.

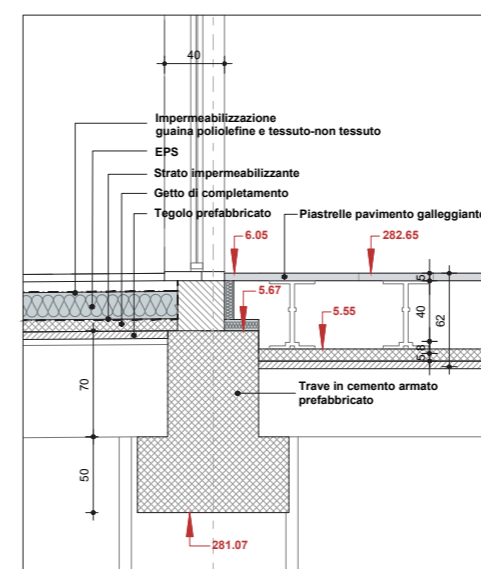
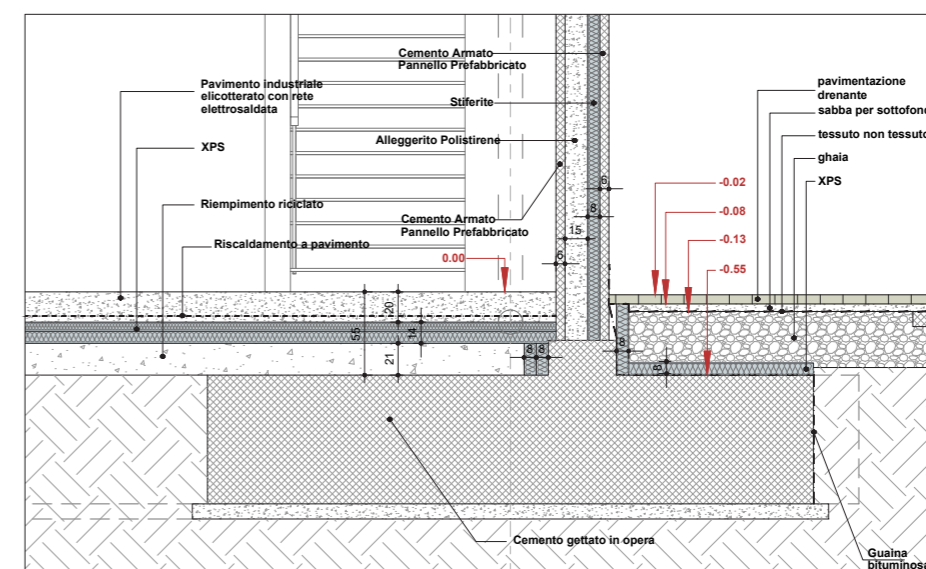


Figura 36: Dettaglio fondazioni in scala 1:50 (figura sopra). Si evidenzia la presenza del calcestruzzo getto in opera per plinti di fondazione e pavimento industriale elicottero.

Figura 37: Dettaglio copertura scala in 1:50 (figura a lato). Si evidenzia la presenza di calcestruzzo nella struttura prefabbricata e nel getto di completamento.

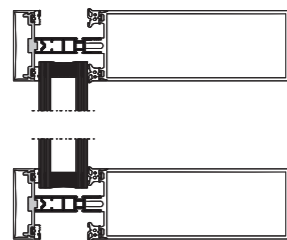
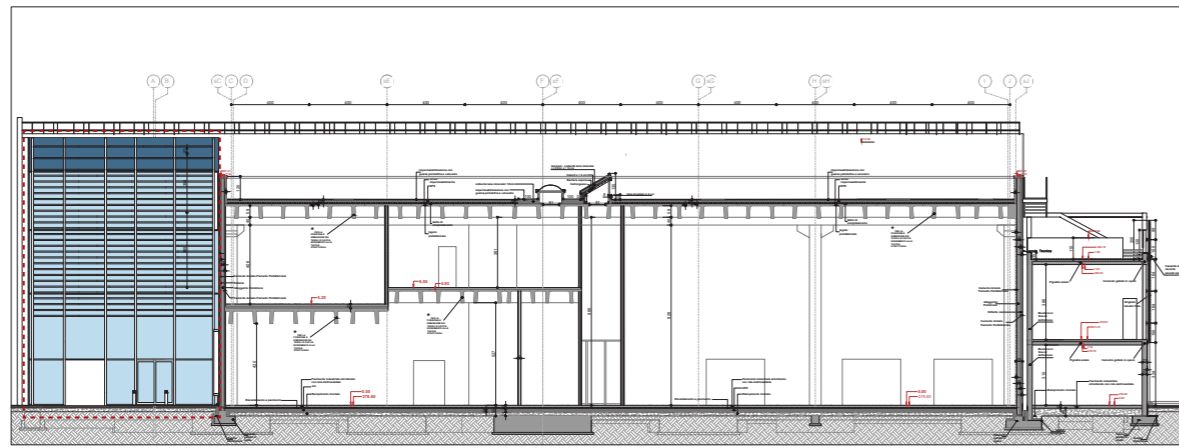


Figura 38: Sezione dell'edificio in cui è evidenziata una porzione vetrata (figura sopra)

Figura 39: Dettaglio sezione verticale del serramento in scala 1:1 (figura a lato)

Calcestruzzo

Dunque, è proprio sui materiali citati sopra che è necessario intervenire per ottenere una efficiente riduzione delle emissioni per i moduli A1-A3. Nello specifico:

Il calcestruzzo impiegato per questo progetto, è di tipo CEM I costituito da circa il 95% di clinker e fino ad un massimo di 5% di altre componenti¹⁰¹. Questa tipologia è la più presente nel panorama edilizio italiano poiché risulta facilmente lavorabile grazie all'alta quantità di clinker che lo compone e ad una buona resistenza iniziale¹⁰².

Un'alternativa al CEM I è il CEM II che si differenzia dal primo poiché composto tra il 65% e il 94% da clinker e la restante parte da sottoprodotti come la loppa d'altoforno oppure da altri componenti come la silice fume o le pozzolane¹⁰³. Riducendo la quantità di clinker in favore di componenti provenienti da altre lavorazioni è possibile ridurre l'impatto ambientale del calcestruzzo. Infatti, in base ai valori presi in considerazione dall'EPD per i calcoli svolti nel capitolo 4, l'impatto di una tonnellata di CEM I è di 945 kgCO₂eq, mentre per la stessa quantità di CEM II le emissioni si attestano attorno a 780 kgCO₂eq.

Anche dal punto di vista del costo, il CEM II risulta più sostenibile. Infatti un sacco da 25 kg di CEM II costa circa 5,5€ contro i 6,5€ per il CEM I¹⁰⁴. Anche se la

variazione non è così sostanziale per piccole quantità, considerando le 4.692,23 tonnellate impiegate per la costruzione di Pattern Head Quarter, il risparmio economico è di circa 187.689,39 € ovvero circa il 15%.

Alluminio

Nel documento che definisce e regola i CAM - Criteri Ambientali Minimi, non riporta una percentuale minima di riciclo che deve essere presente in un prodotto¹⁰⁵. Per il progetto preso come caso studio, non viene indicato dai progettisti il materiale specifico utilizzato, come avviene invece per la superficie vetrata con sistema di facciata continua. Dunque, per i calcoli riportati nel capitolo precedente, la percentuale di riciclato si attesta attorno al 77%, come riportato da EPD. Optando per un alluminio con una percentuale tra il 90% e il 100%, l'impatto si abbassa di circa 70%.

Adottando queste alternative si ridurrebbero le emissioni per i moduli A1-A3 per entrambi i materiali, mentre per il modulo B4 si riducono gli impatti della sostituzione dei serramenti in alluminio. Come si evince dalla Tabella 36, la riduzione totale del GWP supera la soglia minima del 10% al di sopra della quale la riduzione risulta significativa.

Tabella 39: Riduzioni delle emissioni di CO₂eq a fronte delle strategie per i moduli A1-A3, B4

Elementi e materiali	kgCO ₂ eq	Riduzione GWP [%]
CEM I	3,3E+06	16%
CEM II	2,8E+06	
Alluminio 77%	2,8E+05	58%
Alluminio 90%-100%	1,2E+05	
TOTALE EDIFICIO		16%

La riduzione del GWP del 16% risulta significativa. Le figure sottostanti mostrano la riduzione di emissioni di CO₂eq legate all'EC secondo la classificazione LETI.

Figura 40: Classificazione delle emissioni dell'EC del progetto Pattern HQ attuale, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon

Figura 41: Classificazione delle emissioni dell'EC a fronte delle strategie proposte, elaborazione personale da LETI, Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon

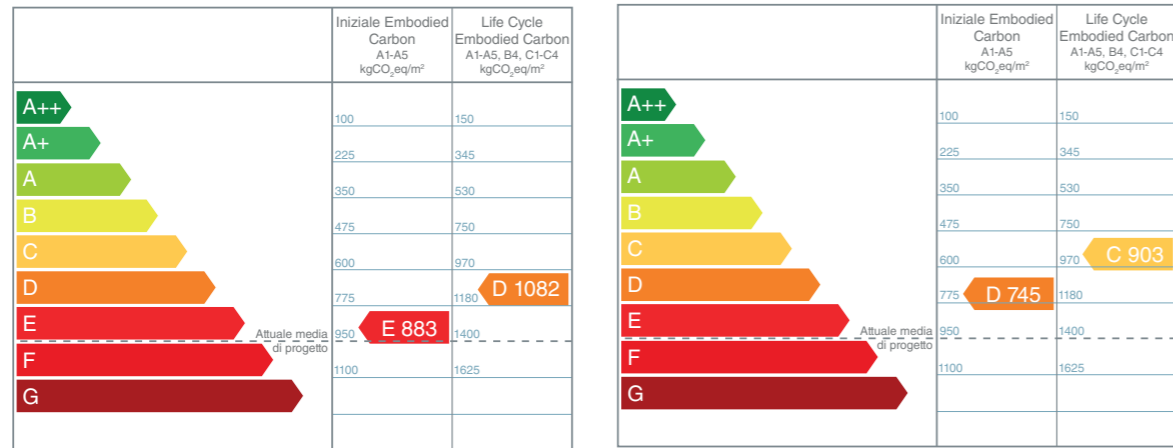
101. AITEC, Classificazione dei cementi, <https://www.aitecweb.com/Il-Cemento/Classificazione-dei-cementi>, visionato il 24/05/2025

102. Dari A., Schvarcz R., Cementi sostenibili: più silos, più controlli per un'evoluzione del calcestruzzo, 2024, <https://www.ingegno-web.it/articoli/cementi-sostenibili-piu-silos-piu-controlli-per-un-evoluzione-utile-del-calcestruzzo/>, visionato il 24/05/2025

103. AITEC, Classificazione dei cementi

104. Prezzo riferito ai prodotti Buzzi Unicem, Viglieno edilizia, CEMENTO 525 BUZZI Kg. 25, <https://viglianoedilizia.it/prodotto/cemento-525-buzzi-kg-25/>, CEMENTO 425 BUZZI Kg. 25, <https://viglianoedilizia.it/prodotto/cemento-425-buzzi-kg-25/>, visionati il 24/05/2025

105. CAM vigenti, Tratto da Green Public Procurement (GPP) - Criteri Ambientali Minimi, <https://gpp.mase.gov.it/CAM-vigenti>, visionato il 24/05/2025



5.2. Soluzioni di decarbonizzazione per il modulo B6

Per ridurre l'impatto della fase B6, sarebbe già sufficiente che la rete elettrica italiana procedesse concretamente verso la completa decarbonizzazione. Infatti, calcolando le emissioni in uno scenario a mix energetico variabile, il peso di questa fase sull'intero ciclo di vita dell'edificio si riduce in modo significativo, come si può notare dai grafici riportati di seguito:

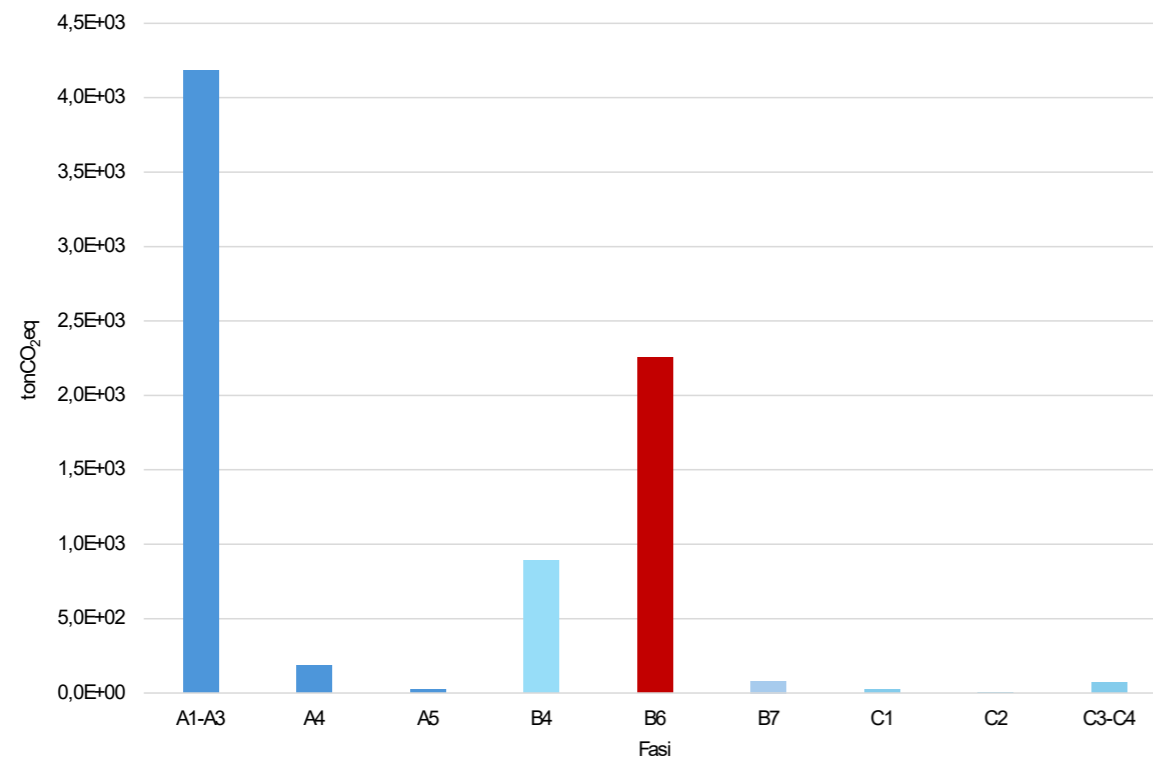


Figura 42: Totale emissioni per ciascuna fase calcolata con calcolo OC scenario variabile

Rispetto allo scenario fisso si ha una riduzione di circa 57% di emissioni operative:

Tabella 40: Confronto emissioni fase B6 calcolata con fattori di emissione fissi e variabili

	kgCO ₂ eq	tonCO ₂ eq	kgCO ₂ eq/m ²
Scenario fisso	1,5E+05	1,5E+05	2,1E+01 ¹⁰⁶
Scenario variabile	2,4E+04	2,4E+01	4,8E+00 ¹⁰⁷

106. GIFA: 4.970,11 m²

107. GIFA: 4.970,11 m²

Inoltre al fine di ottimizzare e ridurre l'impatto del carbonio operativo, può essere utile monitorare i consumi nel corso del tempo con i sistemi di gestione integrata BMS (Building Management System) e riefettuare una diagnosi energetica periodicamente nel corso della vita dell'edificio come suggerito dal Decreto Legislativo n. 102 del 4 luglio 2014 che recepisce la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica¹⁰⁸.

Nel momento in cui occorre sostituire gli impianti a causa della loro obsolescenza, effettuare nuovamente una diagnosi energetica permette di ricalibrare i consumi energetici annui e di conseguenza prendere coscienza sulle effettive emissioni operative correlate, così da rilevare le criticità tecnico-gestionali e valutare la sostituzione dei componenti impiegando dei generatori di calore, macchine per la refrigerazione più performanti e ridurre le perdite da rete, garantendo un risparmio economico sul lungo termine¹⁰⁹.

Per ridurre i consumi e migliorare la gestione energetica degli edifici, in generale possono essere adottate le seguenti azioni:

- Ottimizzazione dei sistemi di illuminazione

La sostituzione delle sorgenti luminose convenzionali con apparecchi LED ad alta efficienza, abbinata all'implementazione di dispositivi per il controllo automatico dell'illuminamento consente di ridurre i consumi energetici specifici per l'illuminazione variabile in un intervallo compreso indicativamente tra il 30% e il 50%, in funzione del contesto applicativo.

- Rendimento energetico degli impianti HVAC

L'ottimizzazione dei sistemi di climatizzazione mediante l'adozione di unità ad alto coefficiente di prestazione delle macchine impiegate comporta una diminuzione dei fabbisogni energetici pari al 10%. L'integrazione con piattaforme di monitoraggio e gestione avanzata può aumentare l'efficienza complessiva del sistema, con potenziali ulteriori risparmi addizionali che oscillano tra il 15% e il 25%¹¹⁰.

108. Governo della Repubblica Italiana. (2014). Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102. Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Gazzetta Ufficiale, Serie Generale, n. 165 del 18 luglio 2014.

109. AzzerCO2, Diagnosi energetica, da obbligo a opportunità per ridurre consumi e recuperare risorse, <https://www.azzerco2.it/diagnosi-energetica-opportunita-per-ridurre-consumi-e-recuperare-risorse/>, visionato il 29/05/2025

110. Ibidem

- Integrazione di sistemi fotovoltaici

L'installazione di impianti di produzione da fonte solare fotovoltaica consente di autoconsumare una quota significativa dell'energia richiesta dall'edificio o dal processo produttivo. In condizioni operative ottimali, tale contributo può comportare una riduzione del fabbisogno energetico prelevato dalla rete superiore al 20-30%, in relazione alla superficie utile disponibile e all'efficienza dell'impianto installato¹¹¹.

111. AzzerCO2, visionato il 29/05/2025

Nel caso dell'edificio analizzato per il progetto Pattern, poiché risultano già presenti impianti fotovoltaici, sistemi di illuminazione a LED e soluzioni HVAC efficienti, è consigliabile, in fase di rinnovo impiantistico durante il ciclo di vita dell'edificio, mantenere lo stesso progetto, aggiornandolo in base all'evoluzione tecnologica, che presumibilmente offrirà dispositivi ancora più performanti. Si potrà inoltre valutare:

- l'espansione dell'impianto fotovoltaico esistente, con l'obiettivo di coprire una quota maggiore dei consumi energetici rispetto alla situazione attuale corrispondente al minimo richiesto dalla normativa vigente;
- l'introduzione di sistemi di accumulo energetico che permettano di aumentare l'autonomia energetica dell'edificio e sfruttare in modo più efficiente l'energia prodotta localmente;
- l'impiego di dispositivi di gestione intelligente che regolino in tempo reale la distribuzione dell'energia prodotta, attivando i carichi più energivori nei momenti di maggiore disponibilità di energia solare;
- l'adozione di sistemi HVAC dotati di regolazioni intelligenti, in grado di adattarsi dinamicamente alle condizioni climatiche esterne e agli scenari d'uso previsti;
- applicazione di piattaforme di monitoraggio continuo che permettano di adottare strategie di manutenzione predittiva e mantenere costanti nel tempo elevate prestazioni energetiche degli impianti.

5.3. Soluzioni di decarbonizzazione per il fine vita

Un modo per ridurre l'incidenza dei moduli C3-C4, è quello di scegliere già in fase progettuale componenti standardizzati e giunti reversibili per risultare facilmente disassemblabili. Questi infatti sono i principi e la finalità del Design for Disassembly (DfD), ovvero il progetto per lo smontaggio a fine vita degli elementi che costituiscono un edificio. All'interno del progetto del caso studio sono stati utilizzati alcuni componenti prefabbricati come, per esempio, la struttura portante in calcestruzzo prefabbricato per il piano terra e la struttura a telaio impiegata nei due piani superiori. Per le partizioni interne è stato utilizzato un metodo a secco grazie all'utilizzo di pannelli di cartongesso e pannelli isolanti montati su una struttura a montanti e traversi in acciaio.

A fronte di tutto ciò, sarebbe utile prevedere un piano di disassemblaggio indicando quali elementi sono destinati al riciclo e quali al riuso, in modo da scegliere il conferimento in discarica solo quando risulta l'unica via percorribile.

Un'altra modalità in cui le emissioni legate al fine vita vengono ridotte, è quello di ipotizzare che in futuro si affermi e si diffonda l'impiego di metodi virtuosi di trattamento dei rifiuti, quali ad esempio il riciclaggio chimico che rispetto a quello meccanico permette di ricondurre i materiali ai loro componenti chimici di base. Si tratta di una tecnica che permette un recupero di qualità, adatta specialmente per i polimeri plastici complessi che sono difficili da trattare meccanicamente. In questo modo si possono ottenere componenti pari al nuovo, come se fossero realizzati con materiali vergini¹¹².

Tutti questi accorgimenti apportano delle riduzioni significative sulle emissioni di anidride carbonica prodotte per il periodo di riferimento impiegato nel calcolo, tuttavia rimarrebbe sempre una quota che deve essere compensata per raggiungere l'obiettivo zero emissioni.

112. Matiddi M., Il digitale, Tecniche di riciclaggio innovative per ridurre i rifiuti <https://www.ildigitale.it/green/tecniche-di-riciclaggio-per-ridurre-rifiuti/>, visionato il 29/05/2025

Il grafico sottostante riassume le emissioni di EC e OC in 50 anni applicando le strategie di decarbonizzazione per i moduli A1-A3 e B6. In particolare, l'EC per i moduli A1-A3 è stato ripartito proporzionalmente: il primo anno rappresenta il 50% del totale (3/6), il secondo il 33% (2/6) e il terzo il 17% (1/6). Successivamente, le emissioni per il modulo B4 sono state ripartite uniformemente per i 38 anni in cui sono state ipotizzate le operazioni di sostituzione. Per quanto riguarda i moduli C1-C4, le emissioni di EC sono concentrate esclusivamente nel cinquantesimo anno, corrispondente alla fase di fine vita. Infine l'OC è ripartito secondo lo scenario variabile per i 46 anni di uso, escludendo i primi tre anni di costruzione e l'ultimo anno di dismissione.

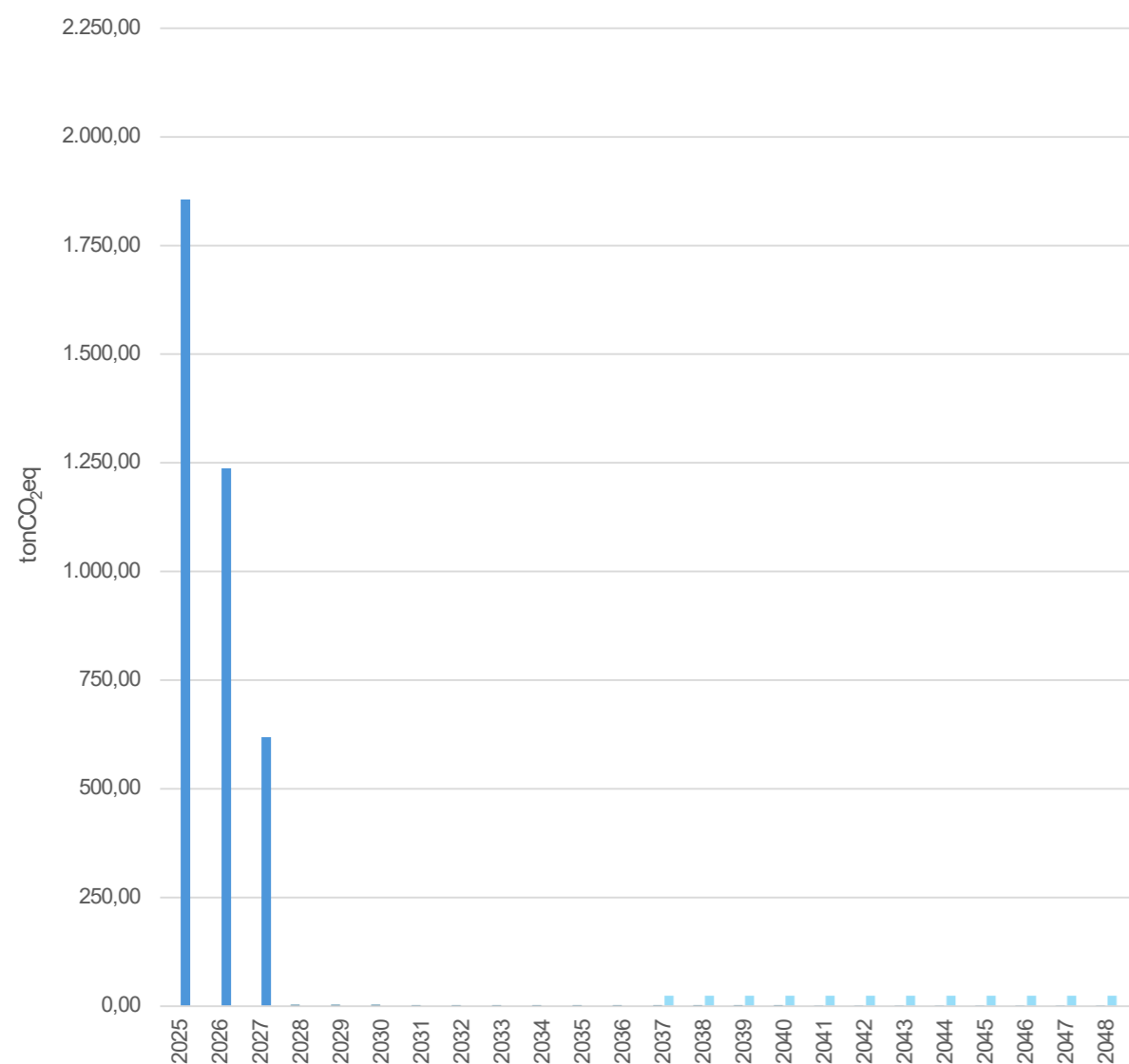


Figura 43: Emissioni Di EC e OC in 50 anni con l'applicazione delle strategie di decarbonizzazione proposte

5.4. Soluzioni di compensazione

Tra le possibili soluzioni di compensazione vi è la piantumazione di un numero adeguato di alberi, in grado di assorbire la quantità di CO₂ risultante dal calcolo WLC. Per effettuare il calcolo degli alberi necessari è stato preso di riferimento il database sviluppato in occasione del laboratorio REBUS¹¹³, compilando il file del tool fornito sul loro sito con i numeri delle specie arboree selezionate e la quantità indicata nella planimetria generale fornita da SMA progetti:

- 44 alberi di frassino orniello;



Albero giovane

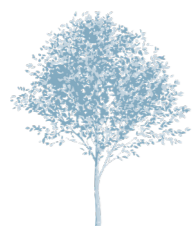
264 kgCO₂eq/anno stoccata



Albero adulto

73.260 kgCO₂eq/anno stoccata

- 7 alberi di pioppo bianco;



Albero giovane

42 kgCO₂eq/anno stoccata



Albero adulto

11.417 kgCO₂eq/anno stoccata

- 19 alberi di tiglio selvatico;



Albero giovane

76 kgCO₂eq/anno stoccata



Albero adulto

68.514 kgCO₂eq/anno stoccata

Gli arbusti non sono stati considerati nel calcolo in quanto il loro contributo allo stoccaggio di emissioni è irrisorio rispetto alla quantità totale.

Per i primi 3 anni si sono considerati questi alberi come nuovo impianto, quindi piante di dimensioni più ridotte e in grado di immagazzinare meno CO₂ rispetto alle piante mature. Le quantità di alberi previsti da progetto non sono sufficienti ad assorbire tutte le emissioni, ragion per cui si è selezionata un'altra specie arborea che potesse adattarsi bene al luogo, ovvero il faggio. Arrotondando per eccesso rispetto alla rimanenza di emissioni da assorbire, sono risultati necessari altri **29** alberi.



Albero giovane

174 kgCO₂eq/anno stoccata



Albero adulto

47.299 kgCO₂eq/anno stoccata

Considerando l'insieme così composto, si è in grado di assorbire 9424,7 ton di CO₂eq in 50 anni, a fronte delle 9395,6 ton di CO₂eq prodotte dall'edificio lungo tutto il ciclo di vita.

Tabella 41: Emissioni di tonCO₂eq stoccata in base all'impianto delle specie arboree selezionate

Progetto	Numero alberi	Alberi giovani (Primi 3 anni)	Alberi adulti (47 anni)
SMA Progetti	70	1,1	7200,0
Stretegia tesi	29	0,5	2223,1
TOTALE	99	1,7	9423,0
TOTALE tonCO₂eq stoccata in 50 anni			9424,7

L'applicazione di questa soluzione non è sempre semplice, difatti occorre disporre di un'area adeguatamente ampia al fine di poter ospitare il numero di alberi necessari a coprire le emissioni totali calcolate nell'analisi oppure di poter identificare terreni siti altrove su cui sia possibile effettuare un'operazione di riforestazione.

Una seconda soluzione per individui, aziende o enti pubblici, è quella di acquistare, dei crediti di carbonio, ovvero certificati rilasciati da un ente governativo o indipendente che attesta una diminuzione di emissioni di gas serra nell'atmosfera¹¹⁴. Infatti, basandosi sul fatto che le emissioni di gas serra si diffondono nell'atmosfera globale, un incremento in un'area specifica ha ripercussioni sull'intero pianeta. Di conseguenza, anche una loro riduzione, ovunque avvenga, contribuisce a migliorare le condizioni atmosferiche a livello mondiale. Dunque, è possibile acquistare questi crediti di carbonio per bilanciare le emissioni prodotte dall'edificio Pattern Head Quarter durante tutto il suo ciclo di vita.

I certificati vengono generati grazie a progetti che mirano alla diminuzione di emissioni anche andando a contribuire allo sviluppo e al miglioramento delle condizioni di vita delle popolazioni locali. Infatti, come si può vedere nella Figura

114. Carbon Offest Guide, Cosa sono i crediti di carbonio, <https://offsetguide.org/what-are-carbon-credits/>, visionato il 24/05/2025

113. Regione Emilia-Romagna, REBUS - Laboratorio sulla rigenerazione urbana e i cambiamenti climatici (2017), <https://territorio.regione.emilia-romagna.it/urbanistica/formazione-ed-eventi/corsi-formazione/rebus-laboratorio-rigeneraz-urbana-cambiam-climatici>, visionato il 24/05/2025

31 tratta dal “The voluntary carbon market” report stilato da South Pole per il 2022-2023, questi progetti sono principalmente localizzati in Cina e in India, due Paesi dalle economie emergenti.

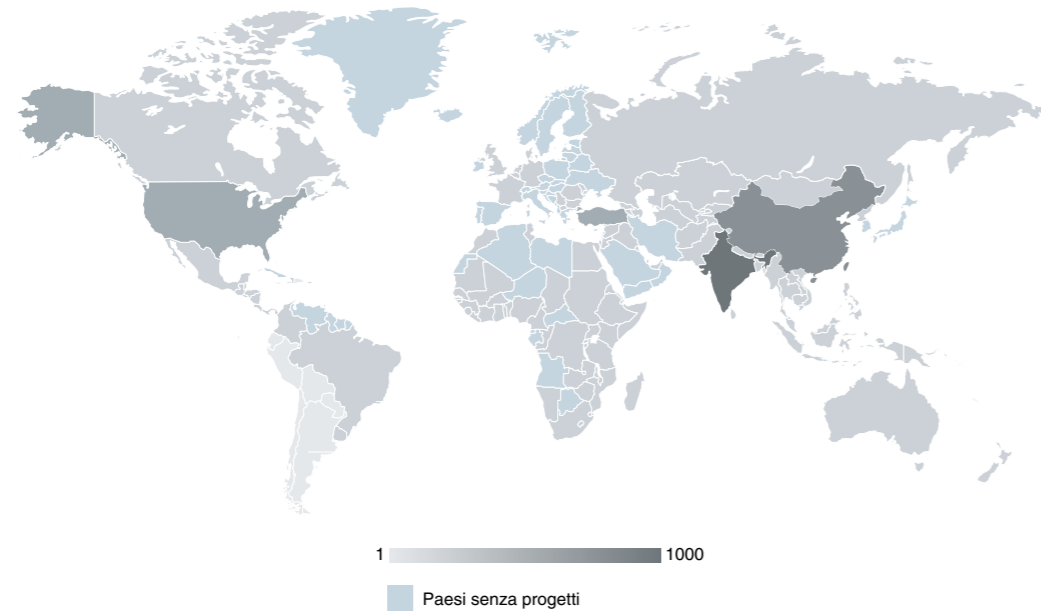


Figura 44: Localizzazione dei progetti che generano crediti di carbonio, rielaborazione grafica personale tratta da South Pole, The voluntary carbon market 2022-2023

Inoltre, come si evince dal grafico riportato in figura 32, il maggior numero di progetti che possono essere finanziati per la compensazione delle emissioni sono quelli che riguardano l’installazione di tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili come impianti fotovoltaici ed eolici. Al secondo posto si attestano i progetti che vanno a dotare le comunità locali di stufe che permettono loro di scaldare l’abitazione e cuocere cibi riducendo i pericoli e le emissioni legate alle fiamme libere¹¹⁵.

115. South Pole, The voluntary carbon market 2022-2023, p.9

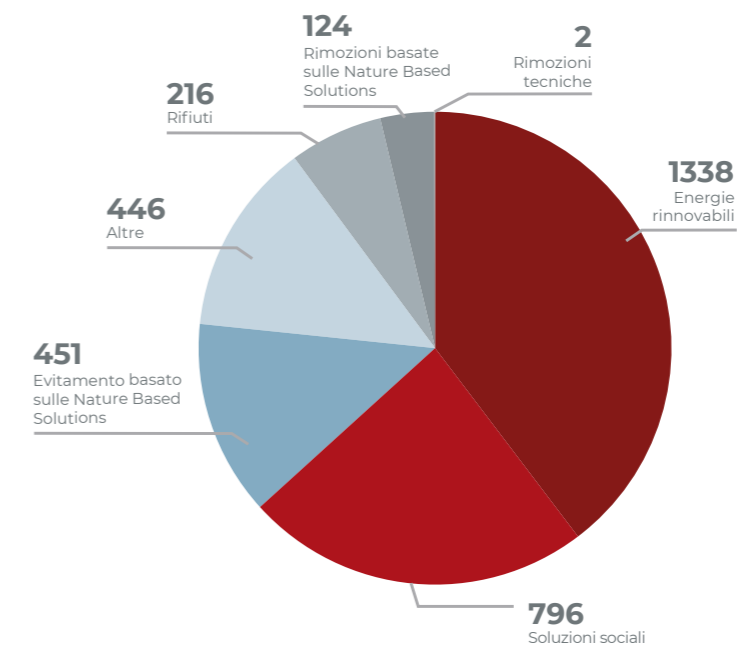


Figura 45: Tipologia dei progetti che generano crediti di carbonio rielaborazione grafica personale tratta da South Pole, The voluntary carbon market 2022-2023

Una volta acquistati, è necessario ritirare i crediti in modo tale che la compensazione sia effettiva, senza che vi sia il rischio di un doppio conteggio. Dopodiché, per effettuare un’altra azione di compensazione, sarà necessario comprare un nuovo credito.

Il mercato dei crediti di carbonio è stato più volte investito da critiche riguardanti la validità dei progetti attuati e la veridicità dei dati forniti in merito alla riduzione delle emissioni¹¹⁶. Inoltre, uno studio del 2024 condotto per verificare e valutare la loro utilità e contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra, stima che solo il 16% dei casi analizzati porta ad un’effettiva riduzione delle emissioni¹¹⁷.

Dunque, per quanto sia attualmente un’opzione largamente utilizzata, l’acquisto dei crediti di carbonio presenta delle criticità, pertanto è auspicabile che questa non venga impiegata come unica modalità di compensazione.

116. Heidi Blake, The New Yorker, The Great Cash-for-Carbon Hustle, <https://www.newyorker.com/magazine/2023/10/23/the-great-cash-for-carbon-hustle>, visionato il 30/05/2025

117. Probst B.S., Toetzke M., Kontoleon A., Diaz Anadon L., Minx J. C., Haya B. K., Schneider L., Trotter P. A., West T. A. P., Gill-Wiehl A., Hoffmann V. H., Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects, 2024, p.1

La presente tesi ha affrontato il tema della valutazione della Whole Life Carbon applicata a un caso studio reale, con l'obiettivo di quantificare, ridurre le emissioni di gas serra lungo l'intero ciclo di vita di un edificio e suggerire strategie di decarbonizzazione e compensazione. Attraverso l'applicazione della metodologia proposta nella pubblicazione "Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE)" (Andreotti J., Giordano R., 2024), si è cercato di dare risposta ai seguenti punti:

1. Quantificare l'Embodied Carbon e l'Operational Carbon lungo il ciclo di vita di un edificio mediante una metodologia consolidata
2. Identificazione delle fasi del ciclo di vita che contribuiscono maggiormente alle emissioni
3. Individuazione delle strategie più efficaci per la decarbonizzazione e la compensazione delle emissioni residue
4. Riconoscere i limiti metodologici e pratici emergono nell'applicazione della metodologia WLC a livello nazionale italiano

L'applicazione della metodologia al caso di studio ha permesso di evidenziare l'importanza di considerare sia le emissioni incorporate (EC) sia quelle operative (OC), dimostrando che un approccio integrato è essenziale per una valutazione completa della sostenibilità ambientale dell'edificio. Tuttavia, il lavoro ha messo in luce alcune criticità significative, che rappresentano altrettanti punti aperti per il proseguimento della ricerca.

In primo luogo, si segnala la mancanza di dati affidabili per la fase A5 (costruzione), infatti i dati necessari per stimare le emissioni relative a cantierizzazione e macchinari sono estremamente frammentari e di difficile reperibilità in letteratura, rendendo il calcolo di questa fase arbitrario. In secondo luogo, permangono carenze normative a livello nazionale, con l'assenza di target quantitativi univoci per la classificazione degli edifici in base al totale delle emissioni WLC. Questo limita la possibilità di fare confronti o stabilire benchmark coerenti all'interno del contesto italiano. La proposta metodologica di Andreotti e Giordano, pubblicata in collaborazione con il Green Building Council Italia, costituisce ad oggi il primo tentativo di fornire linee guida nazionali per il calcolo WLC nel settore delle costruzioni.

Un altro aspetto di criticità è la necessità di integrare nel calcolo le emissioni incorporate degli impianti (non analizzate in questo lavoro per mancanza di dati di progetto), che costituiscono una quota significativa del carico emissivo complessivo, specialmente per edifici ad alta complessità impiantistica, ovvero che

possiedono un impianto proprio con una parte dedicata unicamente al fabbisogno della produzione ma per la cui valutazione non esistono ancora dati specifici o di letteratura sufficienti e. Inoltre, l'analisi dinamica e il monitoraggio del modulo B6 (uso energetico) potrebbero migliorare significativamente l'accuratezza dei risultati rispetto all'attuale approccio statico.

Infine, si sottolinea l'importanza di sviluppare strategie di compensazione ambientale che siano trasparenti, misurabili e integrate nella valutazione WLC. Queste strategie devono seguire il principio di "Avoid-Reduce-Replace-Offset"¹¹⁸, dove la compensazione rappresenta l'ultima risorsa dopo l'adozione di tutte le possibili misure di riduzione diretta. Nel caso specifico analizzato, non è stato possibile azzerare interamente la CO₂eq prodotta lungo il ciclo di vita dell'edificio, pertanto si è optato per una strategia in cui si combina la piantumazione di alberi con l'acquisto di crediti di carbonio (come spiegato nel capitolo 5). Questa scelta è motivata sia dalla disponibilità limitata di suolo per nuove alberature, sia dalla volontà di non affidarsi esclusivamente a strumenti finanziari esterni per il bilanciamento del carico emissivo residuo. Dunque, esattamente come per uno sviluppo sostenibile, una compensazione efficace deve bilanciare soluzioni naturali, azioni locali e strumenti di mercato, in modo da massimizzare l'integrità ambientale e la coerenza progettuale¹¹⁹.

Per poter gestire in modo efficace la complessità e la quantità dei dati di input richiesti nelle diverse fasi dell'analisi, l'utilizzo di fogli Excel strutturati ad hoc si è rivelato uno strumento indispensabile. Attraverso questi supporti è stato possibile tradurre i principi metodologici in formule operative, automatizzando buona parte dei calcoli relativi all'Embodied e all'Operational Carbon. Tutto ciò rappresenta oggi una base per lo sviluppo futuro di un vero e proprio tool di supporto. Un foglio di calcolo completo, dotato di formule preimpostate e integrato con istruzioni d'uso chiare, che potrà costituire un punto di partenza concreto per professionisti e progettisti che si avvicinano per la prima volta alla valutazione Whole Life Carbon. Allo stesso tempo, potrà rappresentare un riferimento operativo anche per coloro che intendono proseguire la ricerca in un ambito tecnico-scientifico sempre più rilevante e strategico nel processo di transizione ecologica del settore edilizio.



<https://storage2.me-qr.com/excel/808dc2b8-937d-43da-a1c3-0f8ad3ef12b2.xlsx>

Scansionando il codice QR si può scaricare il tool di calcolo apribile con Microsoft Excel, da utilizzarsi per il calcolo della WLC secondo la metodologia riportata nella tesi.

118. Andrews, J., 2014.

119. ASVIS, Sviluppo sostenibile, <https://asvis.it/development-sustainable>, visionato il 21/06/2025

Allegati

05

6. Tabelle

Tabella 42: Fattori di emissione per tipologia di risorsa energetica impiegata. Tratto dalla pubblicazione *Strumenti manufatto edilizio, 2024* di Giordano e Andreotti.¹²⁰

Tipologia di risorsa energetica da mix nazionale	Fattore di emissione f_{GHG}	Unità di misura
Energia elettrica da mix nazionale	0.2933	kgCO ₂ eq/kWh
Energia elettrica da o termica da fonte rinnovabile	0.0000	kgCO ₂ eq/kWh
Metano (gas naturale)	2.0050	kgCO ₂ eq/Smc
	0.2035	kgCO ₂ eq/kWh

120. Andreotti J., Giordano R., Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio., 2024, p.91

121. Ivi, p.92

Tabella 43: Calcolo OC_{B6} dettagliata in relazione al singolo servizio energetico previsto in scenario costante.¹²¹

Servizio	Fabbisogno energia primaria totale $Q_{p,tot}$	OE _{ELE-R-j} Fabbisogno energia elettrica da fonte rinnovabile	f_{GHG}	OE _{ELE-R-j} * f_{GHG} totale per servizio
	[kWh/anno]	[kWh/anno]	kgCO ₂ eq/anno	kgCO ₂ eq/anno
Riscaldamento	462'735	341'877	0.0000	0
Acqua calda sanitaria	23'574	19'404	0.000	0
Raffrescamento	45'399	41'990	0.000	0
Ventilazione	47'069	25'898	0.000	0
Illuminazione	258'661	141'377	0.000	0
Trasporto di oggetti o persone	3'274	1'801	0.000	0
Totale	840'712	572'347	0.000	0

Tabella 44: Fattore di emissione calcolati per il periodo di riferimento dal 2025 al 2075, integrando rispetto Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio, 2024 di Giordano e Andreotti.¹²¹

122. Ivi, p.100

Anno di riferimento	$f_{GHG-Mj} + f_{GHG-R}$ [kgCO ₂ eq/kWh]
2025	0.293
2030	0.175
2040	0.089
2050	0.048
2060	0.034
2070	0.021
2075	0.012

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

OE _{ELE-j} Fabbisogno energia elettrica da mix nazionale	f_{GHG}	OE _{ELE-j} * f_{GHG} totale per tipologia risorsa	OC _{B6-sf}	
[kWh/anno]	kgCO ₂ eq/kWh	[kgCO ₂ eq]	[kgCO ₂ eq]	[tCO ₂ eq]
120'858	0.2933	35'448	35'448	35,5
4'171	0.2933	1'223	1'223	1,2
3'409	0.2933	1'000	1'000	1,0
21'171	0.2933	6'209	6'209	6,2
117'284	0.2933	34'399	34'399	34,4
1'472	0.2933	432	432	0,4
268'365	0.2933	78'711	78'711	78,7

ai valori presenti nella pubblicazione *Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life*

123. Andreotti J., Giordano R., Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio., 2024, pp.100-101

Tabella 45: Calcolo OC_{BE} dettagliata in relazione al singolo servizio energetico previsto in scenario variabile.¹²³

Riferimento temporale	2025/2030	2030/2040	2040/2050
Δ step temporali a_{Mj}	5	10	10
$f_{GHG-Mj} + f_{GHG-R}$ [kgCO ₂ eq/kWh]	0.2933	0.1966	0.0887
OE_{ELE-j} Fabbisogno energia elettrica da mix nazionale	$OE_{ELE-j} * a_{Mj}$		
Riscaldamento	604'290	1'280'580	1'280'580
Acqua calda sanitaria	20'855	41'710	41'710
Raffrescamento	17'045	34'090	34'090
Ventilazione	105'855	211'710	211'710
Illuminaizone	586'420	1'172'840	1'172'840
Trasporto di oggetti o persone	7'360	14'720	14'720
Totale	1'341'825	7'375'010	7'375'010

Servizio

2050/2060	2060/2070	2070/2075	OCB6-sv	
10	10	5		
0.0477	0.0336	0.0214		
$OE_{ELE-j} * a_{Mj}$			[kgCO ₂ eq]	[tCO ₂ eq]
1'280'580	1'280'580	604'290	633'272	633
41'710	41'710	20'855	21'855	22
34'090	34'090	17'045	17'862	18
211'710	211'710	105'855	110'932	111
1'172'840	1'172'840	586'420	1'462'415	1'462
14'720	14'720	7'360	7'713	8
7'375'010	7'375'010	1'341'825	2'254'049	2'254

124. Dati da progetto

Tabella 46: Riferimenti l/persona giorno acqua chiara per destinazione d'uso considerati da certificazione LEED¹²⁴

Destinazione d'uso	Quantitativo-	u.m.	Unità	Totale anno	m ₃ totali
Uffici, indoor	92	l/persona giorno	38	1'052'296	1'052,3
Edifici industriali, indoor	45	l/persona giorno	37	501'165	501,2
Totale acqua in ingresso				1'553'461	1'553,5

125. Ibidem

Tabella 47: Affollamenti da progetto considerati per il calcolo dell'Operational Water B7¹²⁵

Area	N.persone
Magazzino principale	4
Magazzino tessuti	7
Area di collaudo	6
Sartoria	20
Ufficio modelli	18
Ufficio prodotto produzione	20
Totale	75

Tabella 48: Calcolo emissioni OC_{B7} Operational Water¹²⁶

	m ³ j	f_{H_2O} [kgCO ₂ eq/m ³]	m ³ j * f_{H_2O} [kgCO ₂ eq/anno]	OC _{B7} [kgCO ₂ eq/anno]
In ingresso	1'553,5	0.34	534.39	1'634.2
In uscita	1'553,5	0.71	1'099.9	

Tabella 49: EPD selezionati e rispettivi codici di riferimento

Materiale	Categoria d'impatto	Database/EPD Number
Fase di produzione	Datasets	
Gyproc DuraGyp 13 Activ'Air	EPD - GyprocDuraGyp 13 Activ'Air	S-P-00935
Polyglass - MAPEI	EPD - Polyglass Spa	S.P.00905 I 4
Gyproc Glasroc X	EPD - Gyproc Glasroc X	S-P-01687
Arena - ISOVER	EPD - Arena Isover	S-P-04467
URSA XPS ECO NIII	EPD . URSA XPS ECO NIII	S-P-08961
TECHGEO - Nonwoven	EPD - TECHGEO - Nonwoven needle punched geotextile fabric	S-P-13757
RESOURCECO - Sand	EPD - RESOURCECO - Sand	S-P-13396
PAVER - filtranti	EPD - PAVER - filtranti	EPDITALY0106
ISOVER - Glasswool Insulation 4+	EPD - ISOVER - Glasswool Insulation 4+	S-P-01138
GYPROC - Igniver	GYPROC - Igniver	S-P-01688
GYPROC - Gyp frame metal profiles	GYPROC - Gyp frame metal profiles	S-P-12275
IBU - Stiferite	EPD - IBU - Stiferite	EPD-STF-20220331-CBC2-EN
URSA - XPS	EPD - URSA - XPS	S-P-08961
GYPROC - Wallboard	EPD - GYPROC - Wallboard	S-P-00938
MORETTI - Pannello sandwich alleggerito	EPD - MORETTI - Pannello sandwich alleggerito	S-P-11909
GEOPLAST - Iglù	EPD - GEOPLAST - Iglù	S-P-08679
COOP CERAMICA - piastrelle grès	EPD - COOP.CERAMICA - piastrelle grès	EPDITALY049
FERALPI - rete elettrosaldata	EPD - FERALPI - rete elettrosaldata	EPDITALY0433
KURTOGLU - frangisole	EPD - KURTOGLU - frangisole	S-P-08730
DONGKUK - travi acciaio	EPD - DONGKUK - travi acciaio	S-P-11678

EP - precast concrete - 40Mpa	EPD - EP- precast concrete - 40Mpa	
BUZZI UNICEM - getto cls	EPD - BUZZI UNICEM - getto cls	EPDITALY0025
FERALPI - armatura	EPD - FERALPI - armatura	EPDITALY0006
INDEX - guaina bituminosa	EPD - INDEX - guaina bituminosa	INIES:20220730516
VEG TECH - tetto verde	EPD - VEG TECH - tetto verde	S-P-11092
GARBELOTTO - pavimento copertura	EPD - GARBELOTTO - pavimento copertura	EPD0476
NYMOLLE - misto granulare	EPD - NYMOLLE - misto granulare	MD-24062-EN
BRETT MARTIN - lucernari	EPD - BRETT MARTIN - lucernari	000356
HYDRO - profili alluminio	EPD - HYDRO - profili alluminio	S-P-07456
SANDIP - vetro finestre	EPD - SANDIP - vetro finestre	S-P-00930
SSAB - lamiera fogli	EPD - SSAB - lamiera fogli	S-P-01921
LUALDI - porte in legno	EPD - LUALDI - porte in legno	EPDITALY0056
UBP - average concrete cellular blocks	EPD - UBP - average concrete cellular blocks	S-P-02411
WICONA - modulo vetrata esterna	EPD - WICONA - modulo vetrata esterna	EPD-K.DM24-095.25.10.2024.11.28.15
WICONA - modulo vetrata interna	EPD - WICONA - modulo vetrata interna	EPD-K.DM24-095.25.10.2024.10.47.44

Tabella 50: Calcolo emissioni del trasporto dei rifiuti ai centri di trattamento e/o discarica¹²⁷

Tipologia di rifiuto	TOT materiale [ton]	Tipologia di mezzo	Carburante	C [ton]	TOT viaggi [n°]
Calcestruzzo	4'692.23	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	181.00
Cartongesso	319.01	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	13.00
Gomma/plastica	22.81	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	1.00
Isolanti	71.90	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	3.00
Isolanti (non recuperati)	22.74	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	1.00
Legno	5.16	Autocarro 7.5-12 t	Diesel	6.00	1.00
Mattoni/Laterizi	3.00	Autocarro < 7.5 t	Diesel	3.50	1.00
Metalli	211.09	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	9.00
Terreni	1'724.29	Autocarro 24-40 t	Diesel	26.00	67.00
Vetro	87.15	Autocarro 12-24 t	Diesel	12.00	8.00

Tabella 51: Calcolo emissioni totali del trattamento per ciascuna tipologia di rifiuto del caso di studio¹²⁸

Tipologia di rifiuto	Quantità		Scenario 2 (70/30)	
	[ton]	Tasso di recupero	Quantità recuperata [ton]	Quantità a discarica [ton]
Calcestruzzo	4'692.23	70	3'284.56	1'407.67
Cartongesso	319.01		223.31	95.70
Gomma/plastica	22.81		15.96	6.84
Isolanti	71.90		50.33	21.57
Panelli sandwich	22.74		0.00	22.74
Legno	5.16		0.00	5.16
Mattoni/Laterizi	3.00		2.10	0.9
Metalli	211.09		147.77	63.33
Terreni	1724.29		1'207.00	517.29
Vetro	87.15		61.00	26.14
Totale			4'992.03	2'167.35

Scenario di trasporto	Distanza [km]	A [ton]	B [ton]	E consumo specifico [l/100 km]	F consumo del mezzo [l]	EC [tCO ₂ e]
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	29.68	1'074.27	3.68
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	29.24	76.02	0.26
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	28.69	5.74	0.02
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	29.06	17.44	0.06
Discarica	15.00	21.50	8.20	28.67	4.30	0.01
Discarica	15.00	16.60	2.40	18.66	2.80	0.01
Centro di trattamento	20.00	12.90	1.20	13.93	2.79	0.01
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	28.90	52.02	0.18
Centro di trattamento	20.00	21.50	8.20	29.62	396.86	1.36
Centro di trattamento	20.00	18.60	2.90	21.23	33.97	0.12
Totale						5.72

Tipologia di trattamento rifiuti	Emissioni totali [tonCO ₂ eq]	Emissioni totali [kgCO ₂ eq]
Open-loop recycling	4.97	4'972.36
Closed-loop recycling	11.64	11'638.08
Closed-loop recycling	0.34	339.74
Closed-loop recycling	0.08	76.19
Discarica	0.03	28.06
Discarica	0.05	46.00
Open-loop recycling	0.00	3.17
Closed-loop recycling	0.23	225.60
Closed-loop recycling	11.28	11'284.76
Open-loop recycling	1.53	1'530.50
Totale	30.14	30'144.47

- About. (s.d.). Tratto da LETI: <https://www.leti.uk/about>
- About us. (s.d.). Tratto da UN-Habitat: <https://unhabitat.org/about-us>
- About us. (s.d.). Tratto da GET Consulting: <https://get-consulting.it/>
- Agora Energy Transition. (2022). Reducing Embodied Carbon in new buildings:RE2020 in France.
- Alliance HQE-GBC. (2022). ROADMAP - A pathway to decarbonization.
- Andreotti, J., & Giordano, R. (2023). Decarbonizzazione dei manufatti edilizi: metodologie per la valutazione della Whole Life Carbon e focus sulla fase di fine vita.
- Andreotti, J., & Giordano, R. (2024). Strumenti per la decarbonizzazione. Valutazione della Whole Life Carbon (WLC) e della Circular Economy (CE) di un manufatto edilizio.
- Andrews, J. (s.d.). Greenhouse Gas Emissions Inventory Reports: FY 14 Briefing. The Sustainability Institute 66.
- Banca dati italiana LCA, BDI-LCA. (2023, maggio 05). Tratto da ARCADIA: <https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>
- Blake, H. (2023, ottobre 16). The Great Cash-for-Carbon Hustle. Tratto da The New Yorker: <https://www.newyorker.com/magazine/2023/10/23/the-great-cash-for-carbon-hustle>
- Bracci, E. (2022). Cos'è e come scegliere un Building Management System (BMS) per lo smart building. Tratto da Ingenio: <https://www.ingenio-web.it/articoli/cos-e-e-come-scegliere-un-building-management-system-bms-per-lo-smart-building/>
- CAM vigenti. (s.d.). Tratto da Green Public Procurement (GPP) - Criteri Ambientali Minimi: <https://gpp.mase.gov.it/CAM-vigenti>
- Camera dei Deputati. (2021). Servizio Studi. Dossier n° 178 - Schede di lettura.
- CEMENTO 425 BUZZI Kg. 25. (s.d.). Tratto da Vigliano edilizia: <https://viglianoedilizia.it/prodotto/cemento-425-buzzi-kg-25/>
- CEMENTO 525 BUZZI Kg. 25. (s.d.). Tratto da Vigliano edilizia: <https://viglianoedilizia.it/prodotto/cemento-525-buzzi-kg-25/>
- Che cos'è l'IPCC. (s.d.). Tratto da IPCC: <https://ipccitalia.cmcc.it/cose-lipcc/>
- Chi siamo. (s.d.). Tratto da Pattern Spa: <https://www.patterngroup.it/it/pattern>

- Classificazione dei cementi. (s.d.). Tratto da AITEC: <https://www.aitecweb.com/Il-Cemento/Classificazione-dei-cementi>
- Cosa sono i crediti di carbonio. (s.d.). Tratto da Carbon Offest Guide: <https://offsetguide.org/what-are-carbon-credits/>
- Dari, A., & Schvarcz, R. (2024, agosto 15). Cementi sostenibili: più silos, più controlli per un'evoluzione del calcestruzzo. Tratto da Ingenio: <https://www.ingenio-web.it/articoli/cementi-sostenibili-piu-silos-piu-controlli-per-un-evoluzione-utile-del-calcestruzzo/>
- Diagnosi energetica, da obbligo a opportunità per ridurre consumi e recuperare risorse. (2019, dicembre 17). Tratto da Azzeroco2: <https://www.azzeroco2.it/diagnosi-energetica-opportunita-per-ridurre-consumi-e-recuperare-risorse/>
- Energy statistics Data Browser. (2025, giugno 10). Tratto da IEA: [lea.org: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=ITALY&fuel=Key%20indicators&indicator=CO2PerCap](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=ITALY&fuel=Key%20indicators&indicator=CO2PerCap)
- Galeone, S. (2021, novembre 26). Cos'è Il Glasgow Climate Pact. Tratto da In a Bottle: <https://www.inabottle.it/it/ambiente/cos-e-glasgow-climate-pact>
- Gazzetta Ufficiale italiana. (2015, giugno 26). Decreto interministeriale 26 giugno 2015.
- GET Consulting s.r.l. (2023). Valutazione preliminare LEED e linee guida per il progetto Pattern HQ.
- Glossary. (s.d.). Tratto da IPCC: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>
- Governo della Repubblica Italiana. (2014, luglio 18). Gazzetta Ufficiale, Serie Generale, n. 165 del 18 luglio 2014. Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102. Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
- Graaf, L., & Broer, R. (2023). Regulierung der lebenszyklus-thg-emissionen von gebauden. Tratto da <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2023/09/Regulierung-der-Lebenszyklus-THG-Emissionen-von-Gebauden-DE-Sept-2023.pdf>
- Green Building Council Italia. (2022). Decarbonizzare il ciclo di vita dell'ambiente costruito. Road map italiana per raggiungere gli obiettivi climatici al 2050.
- Green Deal europeo. (2024, dicembre 3). Tratto da Consiglio Europeo: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/>
- Guolo, E., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Raggiotto, F. (s.d.). Impatti

ambientali dei pannelli in poliuretano. Tratto da https://www.stiferite.com/pdf/Libri/Impatti_ambientali_dei_pannelli_in_poliuretano_espanso_rigido.pdf

- Headquarters PATTERN S.P.A. – Collegno (TO). (s.d.). Tratto da SMAPROGETTI: <https://www.smaprogetti.it/blog/portfolio/headquarters-pattern-s-p-a-collegno-to>
- Home. (s.d.). Tratto da Co2alizione: <https://co2alizione.eco/it/home>
- Home. (s.d.). Tratto da SMAPROGETTI: <https://www.smaprogetti.it/>
- Home. (s.d.). Tratto da EQ Ingegneria: <http://www.eqingegneria.it/>
- Home. (s.d.). Tratto da Tekinda s.r.l.: <https://www.tekinda.it/>
- Home. (s.d.). Tratto da EPD International System: <https://www.environdec.com/home>
- I benefici del riciclo dei mattoni nella produzione di nuovi laterizi. (s.d.). Tratto da CantieriEdili: <https://www.cantieriedili.net/blog/i-benefici-del-riciclo-dei-mattoni-nella-produzione-di-nuovi-laterizi/>
- KyotoClub, & Legambiente. (2023). Decarbonizzare le costruzioni: la nuova sfida del settore edilizio.
- Le parole della sostenibilità. (s.d.). Tratto da ZERO CO2: <https://zeroco2.eco/it/glossario/>
- LETI. (s.d.). Tratto da Defining and Aligning: Whole Life Carbon & Embodied Carbon: <https://www.leti.uk/carbonalignment>
- LETI. (2020). Climate Emergency Design Guide. How new buildings can meet UK climate change targets.
- LETI, L. E. (2020). LETI Embodied Carbon Primer.
- Matiddi M. (2024, agosto 11). Tecniche di riciclaggio innovative per ridurre i rifiuti. Tratto da Il digitale: <https://www.ildigitale.it/green/tecniche-di-riciclaggio-per-ridurre-rifiuti/>
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero delle Politiche agricole, Ambientali e Forestali. (2021).
- Nationally Determined Contributions (NDCs). (s.d.). Tratto da UNFCCC: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>
- Our mission. (s.d.). Tratto da World Green Building Council: <https://worldgbc.org/about-us/our-mission/>
- Our story. (s.d.). Tratto da UNOPS: <https://www.unops.org/about>
- Parlamento Europeo. (2024). Direttiva (UE) 2024/1275 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- Probst B.S., T. M.-W. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects.
- Probst, B. S., Toetzke, M., Kontoleon, A., Diaz Anadon, L., Minx, J. C., Haya, B. K., . . . Hoffmann, V. H. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects.
- Regione Emilia-Romagna. (2017). REBUS - Laboratorio sulla rigenerazione urbana e i cambiamenti climatici. Tratto da <https://territorio.regione.emilia-romagna.it/urbanistica/formazione-ed-eventi/corsi-formazione/rebus-laboratorio-rigeneraz-urbana-cambiam-climatici>
- Riciclaggio del polipropilene (PP) . (s.d.). Tratto da Waste trade: <https://www.wastetrade.com/it/resources/introduction-to-plastics/types-of-plastics/polypropylene-pp/>
- Riciclaggio di lana di roccia, lana minerale e lana di vetro. (s.d.). Tratto da Miltek: <https://www.miltek.it/tipologia-dei-rifiuti/isolanti/>
- Riciclo del calcestruzzo: come riciclare il calcestruzzo e i suoi benefici. (2024). Tratto da Recuperi Zaminga: <https://www.zamingarecuperi.it/riciclo-del-calcestruzzo-come-e-i-suoi-benefici/>
- Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (2023). Whole Life Carbon Assessment per the built environment (global).
- Sistemi LEED. (s.d.). Tratto da Green Building Council Italia: <https://gbcitalia.org/certificazione/leed>
- Socolow , R., & Pacala, S. (2004). Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. Science.
- South Pole. (s.d.). The voluntary carbon market 2022-2023.
- Styles , D. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe.
- Styles, D., Schoenberger, H., Zeschmar-Lahl, B., & Gálvez-Martos, J. L. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe.

- Tessuto non tessuto: come si ricicla? (s.d.). Tratto da Pratrivero nonwovens: <https://www.pratrivero.com/come-riciclare-tnt/>
- Tirado, R., Aublet, A., Laurenceau, S., & Riraudou, R. (2022). Sustainability. Challenges and Opportunities for Circular Economy Promotion in the Building Sector.
- Unione Europea. (2024, aprile 24). Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio.
- United Nations Environment Programme. (2024). Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction.
- Vantaggi del riciclo dei metalli. (s.d.). Tratto da Waste Trade: <https://www.wastetrade.com/it/resources/benefits-of-recycling-metals/>
- Vazquez-Lopez, E., Garzia, F., Perneti, R., Solis-Guzman, J., & Marrero, M. (2020). Assessment Model of End-of-Life Costs and Waste Quantification in Selective Demolitions. Sustainability.
- Vetro e sostenibilità ambientale: un connubio perfetto per il futuro. (2024, giugno 30). Tratto da Vetreria Valmarecchia: <https://www.vetreriavalmarecchia.it/vetro-e-sostenibilita-ambientale-un-connubio-perfetto-per-il-futuro/>
- Villoria Saez, P. D.-A.-A. (2013). Best Practices measures for construction and demolition waste management in building construction.
- Villoria Saez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio González, A., & Porrás-Amores, C. (2013). Best Practices measures for construction and demolition waste management in building construction.
- Wilson, A. (2023). European Parliamentary Research Service.

Il completamento di questo lavoro non sarebbe stato possibile senza il contributo di chi ci ha affiancato con competenza e disponibilità lungo l'intero percorso. Siamo particolarmente grate al Professor Roberto Giordano per la guida attenta, i consigli puntuali e il costante supporto offerto durante tutte le fasi della ricerca.

Il nostro ringraziamento va anche a Federica Gallina, Benedetta Quaglio e Jacopo Andreotti, per l'aiuto concreto e la disponibilità dimostrata, sia sul piano tecnico che umano.

La loro presenza, fatta di ascolto, confronto e indicazioni preziose, ha avuto un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella realizzazione di questa tesi.