POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura per il Progetto Sostenibile (LM-4)

Tesi di Laurea Magistrale

La progettazione del ciclo vita:
applicazione della metodologia LCA e di buone pratiche di DfD al caso studio della Circular Tower a Burgdorf

Relatrice:
Prof. Francesca Thiebat

Co-relatore:
Prof. Guido Callegari

Candidati:
Alice Masoero
s288361

Simone Paro
s287700

Anno Accademico 2021/2022

Un sentito e autentico ringraziamento alla nostra relatrice prof.ssa Francesca Thiebat e al nostro correlatore prof. Guido Callegari per il sostegno e il supporto dimostrato durante questo percorso.

Abstract ITA

La produzione dei materiali per la costruzione degli edifici è responsabile del 11% delle emissioni globali di CO_2 [1]. L'uso di materiali naturali e la scelta di prodotti certificati, a basso impatto ambientale, sono un fattore chiave per raggiungere gli obiettivi climatici che impongono una riduzione delle emissioni di gas climalteranti.
I progressi tecnologici, i prodotti e i metodi di produzione odierni hanno reso tecnicamente possibili nuove costruzioni in legno come vantaggiose alternative ai tradizionali sistemi strutturali in cemento e acciaio.
L'intento di questa tesi è sviluppare un progetto che si basi sui principi della sostenibilità e della circolarità, attraverso l'uso del legno, sia per gli elementi strutturali che per l'involucro.
Il processo di progettazione si basa su due temi chiave: il *design for deconstruction*, come espressione dell'economia circolare, e l'applicazione della metodologia LCA, al fine di controllare e quantificare gli impatti ambientali.
Il presente elaborato si sviluppa a partire dal concorso di idee "Circular Tower" indetto dall'associazione Netzwerk TecLab, avente sede a Burgdorf (Canton di Berna, Svizzera), con la volontà di confrontarsi in un contesto internazionale con ingegneri e architetti esperti di eco-design.
L'obiettivo del concorso è la progettazione di

un edificio di 30 metri di altezza, con una vita utile prevista di 30 anni. La torre deve rispondere ad alcuni requisiti di circolarità. Una volta terminata la sua attività, deve poter essere disassemblata e i materiali che la compongono essere sostituiti, recuperati e riutilizzati oppure riciclati. Inoltre, data l'esigenza di accogliere negli anni diverse funzioni, l'edificio deve essere concepito come una struttura modulare e flessibile.

Per quantificare le emissioni di CO_2 equivalente e il consumo di energia primaria da fonte non rinnovabile è stato fornito a tutti i partecipanti del concorso di idee il software ZPF-tool.

Dato il livello di dettaglio semplificato di questo tool, è stato deciso di effettuare un confronto critico con altri due software professionali, One Click LCA e SimaPro, dal quale è emerso che ZPF si rivela ottimale solo per effettuare analisi preliminari nella fase di *concept design,* ma poco utile nell'elaborazione di dati nelle fasi avanzate del progetto.

Lo sviluppo della presente ha permesso di approfondire, anche attraverso un applicazione progettuale concreta, diverse tematiche relative alla progettazione sostenibile, dimostrando come esse siano strettamente interconnesse.

[1] Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. (2011). Tabella di marcia verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio al 2050.

Abstract ENG

The production of construction materials is responsible for 11% of global CO_2 emissions [1]. The use of natural materials and the choice of certified products, with low environmental impact, are a key factor in achieving the climate objectives that require a reduction in climate-altering gas emissions.

Advances in technology, products and manufacturing methods today have made the new timber constructions technically possible as good alternatives to traditional concrete and steel structural systems.

The intent of this thesis is to develop a project based on the principles of sustainability and circularity, which are applied through the use of wood, both in the structural components and in those of the envelope.

The design is governed by two key themes: design for deconstruction, as an expression of the circular economy, and the application of the LCA methodology, in order to control and quantify the environmental impact.

This research project develops from the "Circular Tower" ideas' competition organized by the Netzwerk TecLab association, based in Burgdorf (Canton of Bern, Switzerland), to which we have participated with the desire to confront in an international context with engineers and architects experts in eco-design.

The aim of the competition was to design a 30-meters-high building, with an expected useful life of 30 years. The tower is designed so that, once its activity is over, it can be disassembled and the materials that compose it can be replaced, recovered and reused or recycled. In addition, given the need to accommodate different functions over the years, the building has a modular and flexible structure.

To quantify CO_2 equivalent emissions and primary energy consumption from non-renewable sources, the ZPF-tool software was provided to all participants in the competition.

Given the approximate level of detail of this tool, it was decided to make a critical comparison with two other software used professionally, One Click LCA and SimaPro, from which it emerged that ZPF is only optimal for carrying out preliminary analyses in the concept design phase.

The development of this master's thesis has allowed to deepen various topics related to sustainable design, showing how they are closely interconnected.

[1] Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. (2011). Tabella di marcia verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio al 2050.

INDICE

Abstract **4**

Glossario **14**

Introduzione **16**

1. Circular Tower: il concorso di idee

1.1 La futura sede dell'associazione Teclab **22**
1.1.1 L'associazione Teclab 22
1.1.2 Le richieste nel bando di concorso 24
1.1.3 I criteri di valutazione 28

1.2 Analisi del contesto **32**
1.2.1 La città di Burgdorf 32
1.2.2 Le analisi climatiche 36
1.2.3 Analisi cartografica 56
1.2.4 Sopralluogo 69

1.3 Il progetto **80**
1.3.1 Le destinazioni d'uso 80
1.3.2 Il metaprogetto 87
1.3.3 Definizione delle utenze 88
1.3.4 Concept progettuale 90
1.3.5 Elaborati in scala 1:200 102
1.3.6 Laboratori in movimento 116
1.3.7 Le serre bioclimatiche 137
1.3.8 Il ciclo dell'acqua 126
1.3.9 La progettazione antincendio: Norme SIA 132
1.3.10 L'impianto strutturale in legno 136
1.3.11 La gestione del cantiere 140
1.3.12 Le fasi di costruzione, i solai e le pareti prefabbricati 144

1.4 Conclusioni **155**
1.4.1 Esiti del concorso 155
1.4.2 Considerazioni finali 159

2. Calcolo dell'impatto ambientale mediante metodologia LCA applicato al caso studio "Circular Tower"

2.1 La responsabilità del settore edile verso l'ambiente **162**

2.2 Metodologia LCA **180**
2.2.1 *Life Cycle Thinking* 180
2.2.2 *Life Cycle Assessment* 182
2.2.3 Origini dell'LCA 184
2.2.4 LCA nell'edilizia 188
2.2.5 Le fasi dell'LCA 194

2.3 I software utilizzati per l'analisi LCA **202**
2.3.1 ZPF-tool 203
2.3.2 SimaPro 230
2.3.3 One Click LCA 261

2.4 Confronto dei dati e conclusioni **280**

3. Progettazione della circolarità attraverso il DfD applicato al caso studio “Circular Tower”

3.1 L’Economia Circolare come strumento di sostenibilità 294
3.1.1 I princìpi e le strategie dell’Economia Circolare 298
3.1.2 I livelli micro, meso e macro nell’EC 305
3.1.3 Gli aspetti territoriali dell’EC 307
3.1.4 Il contesto europeo 309
3.1.5 Il contesto svizzero 318

3.2 Il DfD come espressione della circolarità nel settore edile 326
3.2.1 Metodologia applicativa del *DfD* 333
3.2.2 *Design process* 341
3.2.3 Applicazione del DfD al caso studio Circular Tower 346

3.3 Scenari di fine vita dei materiali e dei componenti dell’edificio 352
3.3.1 Le tipologie di rifiuti del legno 362
3.3.2 Il legno strutturale 366
3.3.3 L’Oriented Strand Board 386
3.3.4 I pannelli isolanti in fibra di legno 388
3.3.5 Le membrane impermeabilizzanti 392
3.3.6 Il cartongesso 395
3.3.7 Il fibrogesso 398

3.4 Considerazioni conclusive 399

Conclusioni 402

Glossario

- **BIM** - Building Information Modeling
- **CED** - Cumulative Energy Demand
- **CLT** - Cross Laminated Timber
- **COP** - Conference of Parties
- **DfD** - Design for Deconstruction
- **DfDR** - Design for Deconstruction and Reuse
- **EC** - Embodied Carbon
- **EE** - Embodied Energy
- **EoL** - End of Life
- **EP** - Energia Primaria
- **EPD** - Environmental Product Declaration
- **FSC** - Forest stewardship Council
- **GWP** - Global Warming Potential
- **IPCC** - Intergovernmental Panel On Climate Change
- **LCA** - Life Cycle Assessment
- **LCI** - Life Cycle Inventory
- **LCIA** - Life Cycle Impact Assessment
- **LVL** - Laminated Veneer Lumber
- **MDF** - Medium Density Board
- **MFA** - Material Flow Analysis

- **MPS** - Materia Prima Seconda
- **OC** - Operational Carbon
- **OE** - Operational Energy
- **OSB** - Oriented Starnd Board
- **PEFC** - Programme for Endorsement of Forest Certification schemes
- **PIL** - Prodotto Interno Lordo
- **POP** - Persistent Organic Pollutions
- **PV-FV** - Photovoltaic Panels - (Pannelli Fotovoltaici)
- **RSU** - Rifiuti Solidi Urbani
- **UBP** - Punti di Impatto Ambientale

Introduzione

L'esaurimento delle risorse non rinnovabili largamente impiegate per lo sviluppo economico mondiale, così come il loro impatto ambientale, sono criticità significative attualmente all'origine di una transizione che caratterizza il loro utilizzo.
Il settore edile è responsabile di un ampio uso di fonti energetiche, di materiali e di un elevata produzione di rifiuti.
Gli attori che influenzano la direzione verso un percorso più *ecosostenibile* sono molteplici. In primis vi sono i progettisti, i quali devono lavorare attivamente per combattere il cambiamento climatico proponendo soluzioni meno impattanti. Anche altri soggetti come i committenti, i produttori e gli utenti finali, attraverso le loro scelte condizionano il consumo di risorse e la produzione di emissioni.
In questo contesto, i concorsi di progettazione si rivelano, per architetti e ingegneri, un'ottima opportunità per affrontare le nuove sfide imposte dal cambiamento climatico, confrontandosi su diversi ambiti di ricerca e sull'attuazione di varie soluzioni.
L'obiettivo della presente tesi è quello di rispondere in modo completo ed efficace alle esigenze espresse da TecLab nel bando di concorso

per la sua nuova sede, attraverso l'approfondimento di due tematiche principali: l'analisi dell'impatto ambientale con metodo LCA e il *Design for Deconstruction* (DfD). Pertanto, l'elaborato rappresenta un percorso progettuale che applica i principi della circolarità espressi attraverso lo studio del ciclo vita dei prodotti e del manufatto edilizio.

La partecipazione al concorso indetto da TecLab ha rappresentato un'occasione per riflettere sul significato del termine "circolarità", mediante lo sviluppo progettuale di un edificio di 30 metri di altezza. Ubicata a Burgdorf, la torre è concepita come banca di materiali riutilizzabili e riciclabili, diventando un vero e proprio laboratorio che possa ispirare altri progetti sul tema della costruzione circolare. Inoltre, la sensibilità della committenza svizzera verso un'architettura sostenibile ci ha invogliati ad approfondire questa tematica applicando il *Life Cycle Assessement* con i software SimaPro e OneClick LCA al fine di paragonare i risultati ottenuti con ZPF-tool, fornito da TecLab. Questo confronto ha l'obiettivo di verificare se i software ideati per una fase di *concept design* forniscano output simili a quelli ottenibili con programmi utilizzati da professionisti anche in fasi di progetto più avanzate.

Il risultato atteso è quello di ottenere un edificio progettato secondo i principi della circolarità, realizzato mediante la scelta accurata dei ma-

teriali da costruzione in termini di riciclaggio, formato commerciale e modalità di posa.
Il presente documento è suddiviso in tre capitoli, ognuno dei quali tratta una tematica differente. Nel primo capitolo è descritto l'iter progettuale della Circular Tower in risposta alle esigenze espresse dal bando di concorso.
Nel secondo capitolo è stata svolta l'analisi LCA del caso studio con ZPF-tool, fornito dalla committenza, SimaPro, uno dei più utilizzati in questo ambito, e OneClick LCA, scelto per l'interoperabilità BIM. Per ognuno saranno riportate e riassunte le potenzialità e i limiti riscontrati dopo il loro utilizzo. L'impiego dei software in itinere, ovvero parallelamente alla progettazione, ha permesso di effettuare scelte più consapevoli. Infatti, l'analisi condotta ha supportato l'identificazione, relativamente alla Circular Tower, degli elementi tecnici aventi un impatto maggiore in termini di Global Warming Potential e di Energia Primaria non rinnovabile.
Il confronto è stato anche utile a smentire la difficoltà e la laboriosità spesso attribuita all'analisi LCA da parte dei progettisti: l'analisi di impatto può essere svolta mediante un semplice foglio di calcolo, che imbastisce un primo approccio al tema.
Infine, il terzo capitolo è dedicato alla transizione verso una Economia Circolare nel settore edile declinata principalmente negli aspetti di pianificazione del progetto, attraverso il *Design*

for Deconstruction. La Circular Tower è resa disassemblabile grazie allo studio effettuato su alcuni nodi strutturali e sulla progettazione di solai e pareti prefabbricate. I componenti dell'edificio sono infatti sostituibili, quindi facilmente riparabili e, al termine della vita utile, riutilizzabili o riciclabili.

CAPITOLO 1

Circular Tower: il concorso di idee

1.1 La futura sede dell'associazione Teclab
1.2 Analisi del contesto
1.3 Il progetto
1.4 Conclusioni

1.1 La futura sede dell'associazione Teclab

1.1.1 L'associazione Teclab

L'associazione "Netzwerk TecLab", avente sede a Burgdorf, in Svizzera, promuove le regioni dell'Emmental e dell'Oberaargau (Canton di Berna) come centro nazionale per la gestione sostenibile, in particolare per l'economia circolare.

Il TecLab offre spazio, ambiente, infrastrutture, accesso alla ricerca e una cultura di rete di fiducia per promuovere i processi di innovazione.
L'associazione è stata fondata su iniziativa dell'Università di Scienze Applicate di Berna in collaborazione con l'Istituto Tecnico di Berna, l'Università di Scienze della Formazione di Berna, il Dipartimento dell'Istruzione e della Cultura del Canton Berna, la città di Burgdorf e le associazioni imprenditoriali del Canton Berna Associazione del Commercio e dell'Industria e PMI bernesi. Il team di progetto, attualmente composto da dipendenti delle organizzazioni partner, sviluppa offerte rivolte alle aziende, all'istruzione superiore, alle famiglie e ai bambini, garantendo che tutti possano dare un contributo per un futuro sostenibile.
La crescente digitalizzazione e messa in rete dei processi produttivi e di servizio nell'Industria 4.0 solleva interrogativi a cui è possibile

rispondere solo tenendo conto degli aspetti di sostenibilità economica, sociale ed ecologica. Questo sviluppo presenta, in particolare per le aziende commerciali e industriali, nuove sfide nella ricerca di specialisti adeguati nelle professioni tecniche.
Con offerte ed eventi per scuole e insegnanti, aziende e privati, il TecLab si impegna a promuovere i giovani professionisti delle professioni STEM nel cantone di Berna e lo sviluppo sostenibile, in particolare nelle regioni dell'Emmental e dell'Oberaargau.

Oltre alle attività STEM, presso il TecLab si svolgono eventi e formazione continua per privati e aziende interessati. Il focus è posto sulle priorità che toccano i settori dell'economia circolare, dell'energia e della mobilità; centrali sono anche le tematiche legate alla vita sostenibile e al business. Tutti gli eventi sono organizzati dalla rete dell'associazione TecLab, che offre anche servizi e consulenza nei settori della gestione del riciclo e della promozione di giovani professionisti.

1.1.2 Le richieste nel bando di concorso

Con il progetto Circular Tower, l'edilizia circolare è posta come fulcro del concorso e trova espressione sotto forma di un edificio che mira ad essere un vero e proprio laboratorio.
L'edificio dovrebbe servire come fonte di ispirazione per ulteriori progetti innovativi nell'ambito dell'economia circolare accogliendo i visitatori e i partecipanti agli eventi all'interno e intorno alla Circular Tower.
Il progetto apre lo spazio a un luogo di incontro e amplia le offerte STEM per le classi scolastiche e le famiglie, rappresentando i temi principali del TecLab.
Gli obiettivi del concorso si concentrano sulla sostenibilità edilizia, sull'utilizzo di materiali rinnovabili e climaticamente neutri, sulla scelta di componenti riciclati e sulla riutilizzabilità dei nuovi materiali impiegati.
Il compito è quello di erigere un edificio multipiano con altezza massima di 30 m e strutture in parte intercambiabili con lo scopo di ispirare i passanti e i visitatori attraverso la sua estetica.

Nel programma di gara sono richieste alcune specifiche relative alla materializzazione:
l'edificio dovrebbe preservare le risorse naturali e promuovere la biodiversità nei processi di pianificazione, costruzione e manutenzione grazie ai suoi materiali edili rinnovabili e clima-

ticamente neutri e ai componenti riutilizzati. Nel caso ci fossero materiali riutilizzati, deve essere nominata una fonte potenziale, preferibilmente locale. Ad ogni fase del cambiamento e soprattutto in fase di smantellamento al termine dell'utilizzo complessivo, tutti i componenti dovranno poter essere riutilizzati o nel loro insieme o come materia prima secondaria per il riciclaggio o, nel caso di materie prime rinnovabili, restituiti al ciclo biologico.

Vincoli progettuali

Il perimetro di lavorazione comprende un'area edificabile di 263,5 m^2. (Figura 1)
La popolazione arborea esistente non può subire variazione, ad accezione dell'albero a nordovest dell'edificio Jlcoweg 10 per il quale può essere eseguita una piantumazione sostitutiva.

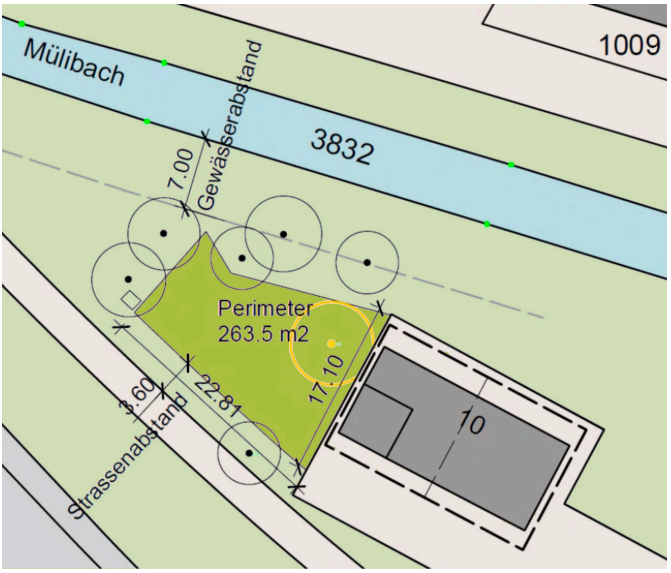


Figura 1: Planimetria dei vincoli progettuali.

Fonte: produzione propria basata sul bando di concorso Circular Tower.

01 I componenti dovranno soddisfare le normative edilizie richieste per l'uso tra cui la protezione antincendio e la stabilità strutturale.

02 L'uso dei singoli piani dovrebbe essere il più flessibile possibile.

03 Due piani, di metratura compresa tra 80 e 100 m^2 ciascuno, posti uno sopra l'altro, dovranno ospitare degli eventi ed essere riscaldabili ed utilizzabili tutto l'anno.

04 Almeno tre piani dovranno essere progettati come aree per moduli di ricerca intercambiabili e il volume dello spazio libero non potrà essere inferiore a quello necessario per il posizionamento di alcuni container High Cube Standard di 6.058 x 2.438 x 2.896 m.

05 Almeno tre container dovrebbero poter essere posizionati su ogni piano.

06 Tutti i piani devono avere un'altezza netta di almeno 3,0 m.

07 L'edificio dovrebbe comprendere una piattaforma di osservazione liberamente accessibile su un piano.

08 I piani, ad eccezione dei piani per eventi, potrebbero essere progettati come corpi spaziali chiusi o aperti con moduli chiusi.

09 L'edificio dovrà essere autosufficiente in termini di acque dolci e reflue.

10 I servizi igienici sono obbligatoriamente richiesti solo nei piani degli eventi.

11 Gli interventi nel terreno naturale devono essere ridotti al minimo.

12 L'accessibilità è necessaria per tutti i piani.

13 Un piano potrà essere dedicato ad attività espositive.

Figura 2: Logo dell'associazione TecLab .

Fonte: TecLab Burgdorf: Startseite. (2020). TecLab. https://teclab.swiss/

1.1.3 I criteri di valutazione

1 Architettura ed effetto scenografico della segnalazione (contesto, genius loci e bellezza)

2 Concetto di costruzione circolare e materializzazione sostenibile, nonchè tecnologia edilizia

3 Funzionalità e flessibilità d'uso

4 Economia e praticabilità

Soddisfare le esigenze di design ed estetica con un effetto landmark.
Potenziare l'identità spaziale e culturale.
Collegare le conoscenze interdisciplinari.

Descrivere le tipologie, l'origine e la proporzione delle materie prime nei materiali utilizzati.
Descrivere la loro potenziale riciclabilità e il loro impatto ambientale.
Sviluppare concetti energetici.
Sviluppare il ciclo dell'acqua
(fornitura e smaltimento)
Valutare l'impatto ambientale secondo ZPF-tool.

Concetto logistico con scambio di moduli
(sopratutto per moduli di ricerca autosufficienti)
dal camion al luogo di utilizzo
Descrizione della flessibilità nel cambio di destinazione d'uso.
Accessibilità.
Fruizione facile per i visitatori.

Proporzionalità, fattibilità pratica ed economica su un ciclo di vita massimo di 30 anni.
Tipologia e probabilità della disponibilità dei componenti riutilizzabili proposti.
Descrizione del valore dei materiali
(considerare l'edificio come magazzino di materiali)

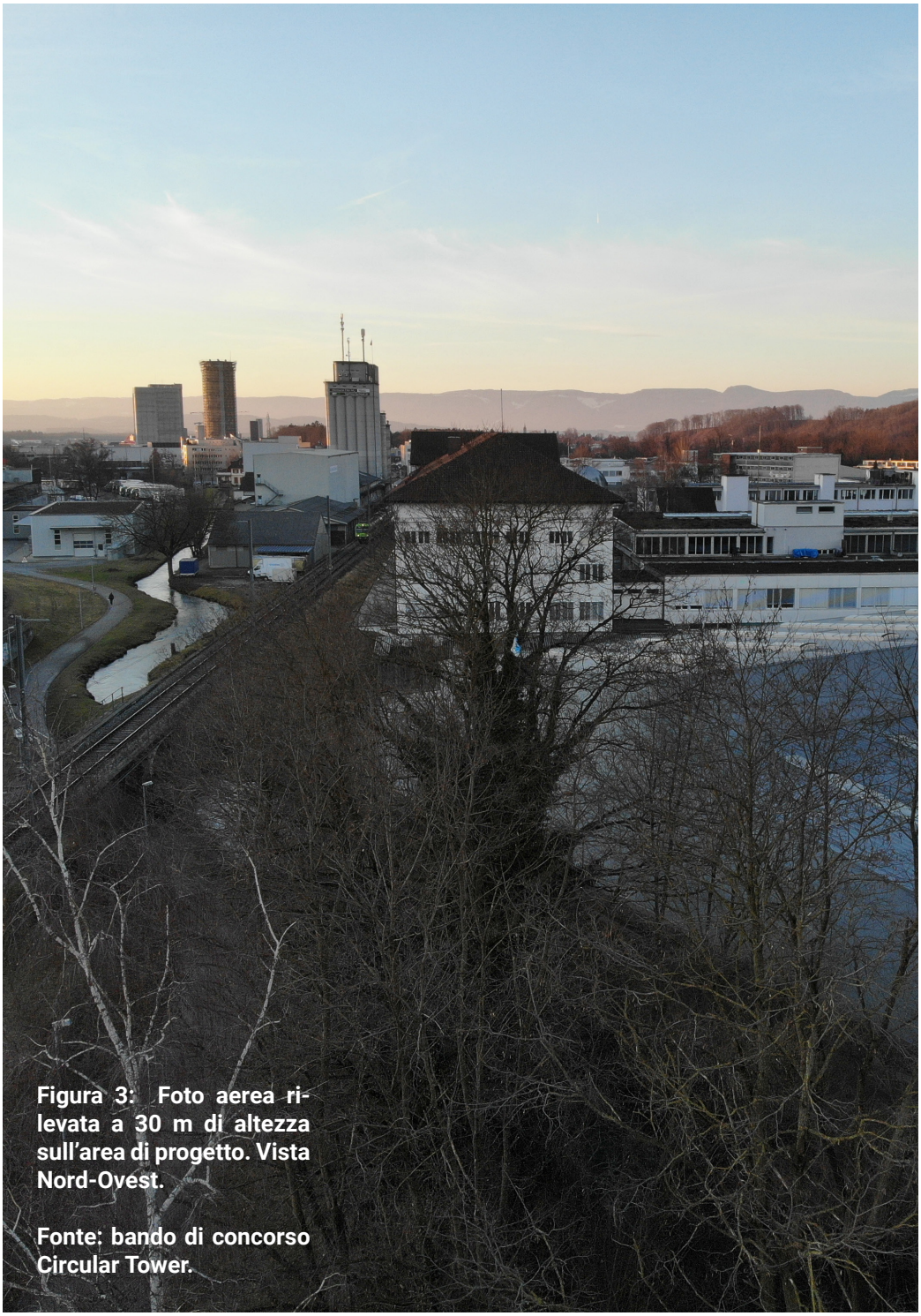


Figura 3: Foto aerea rilevata a 30 m di altezza sull'area di progetto. Vista Nord-Ovest.

Fonte: bando di concorso Circular Tower.

Figura 4: Foto aerea rilevata a 20 m di altezza sull'area di progetto. Vista Sud-Est.

Fonte: bando di concorso Circular Tower.

1.2 Analisi del contesto

1.2.1 La città di Burgdorf

L'estensione

Burgdorf è collocata nel centro-nord della Svizzera, distante 25 km da Berna, 108 km da Zurigo e 180 km da Ginevra.
Con un'estensione di soli 15,60 km^2 e circa 16'000 burgdorfer (abitanti di Burgdorf), la città rappresenta il cuore economico della regione dell'Emmental-Alta Argovia, situata nel Canton di Berna. (Figura 5)
La valle dell'Emmental si colloca nell'area dell'Altipiano svizzero: territorio a nord delle Prealpi Svizzere, che si estende dalla città di San Gallo (Est) a Ginevra (Ovest) occupando il 30 % del territorio nazionale.

Figura 5: Schema rappresentante la suddivisione delle aree svizzere all'interno del Canton Berna.

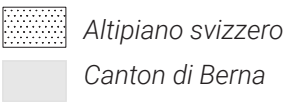
Fonte: produzione propria.

Lo sviluppo urbano

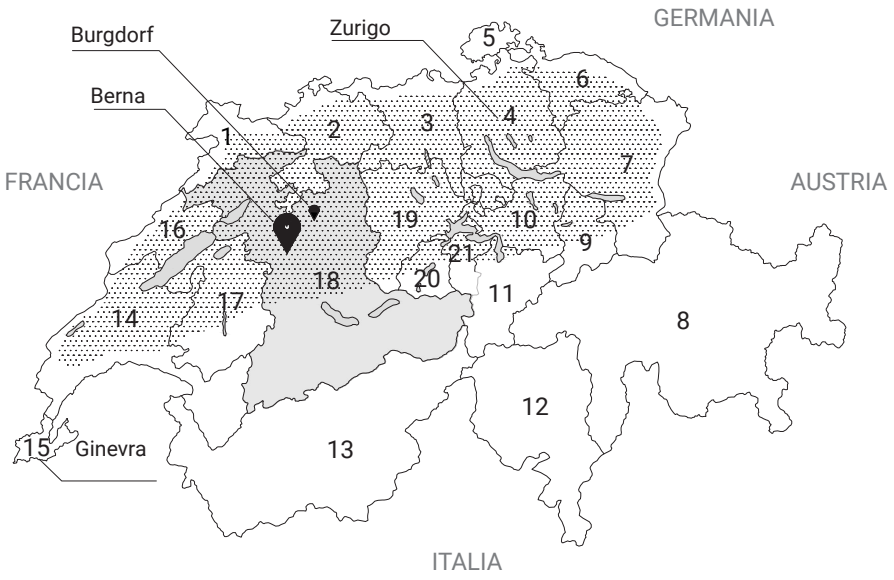
Il tessuto urbano di Burgdorf si sviluppa attorno al castello di origine medievale, realizzato dal duca Berchtold Von Zähringen intorno al 1200, sulla collina della città cinta dal fiume Emme sul versante est, risultando così una posizione strategica.
In continuità al primo tessuto medievale si può osservare un area occidentale di più recente realizzazione. (Figura 7)

Figura 6: Schema rappresentante le principali suddivisioni amministrative del territorio svizzero.

Fonte: produzione propria.



1. JUra Bernois
2. Bienna
3. Aarberg
4. Oberaargau
5. Berna
6. Emmental
7. Thun
8. Fritigen-Niedersimmental
9. Obersimmental-Saanen
10. Interlaken-Oberhasli



1. Jura 2. Solothurn 3. Aargau 4. Zurigo 5. Schaffhausen 6. Thurgau 7. St. Gallen 8. Graubunden 9. Glarus 10. Schwyz 11. Uri 12. Ticino 13. Valais 14. Vaud 15. Ginevra 16. Neuchatel 17. Fribourg 18. Berna 19. Lucerna 20. Obwalden 21. Nidwalden

I fiumi

Il corso d'acqua principale della città di Burgdorf, che cinge la città sul versante Est diventando un confine naturale, è il fiume Emme. Esso prende il nome dalla regione in cui si sviluppa per una lunghezza complessiva di 80 km. Nasce in un area naturale protetta di rilevanza europea diventando poi affluente del fiume Aar.

L'autostrada

L'autostrada A1 costeggia sul versante nord-ovest la città di Burgdorf, ed è il collegamento carrabile veloce per raggiungere le città più importanti. Questa autostrada, infatti, è l'asse principale est-ovest che connette la forntiera francese all'autostrada A13 nei pressi della frontiera austriaca, passando da Ginevra, Losanna, Berna e Zurigo.

La ferrovia

Il Sistema Ferroviario Svizzero (FFS) si dirama prevalentemente nell'area dell'alto piano, a nord, con una fitta rete di collegamenti tra le località di maggiore importanza.
A Burgdorf sono presenti , rende quest'ultima ben collegata con le principali città svizzere.
Burgdorf è servita da più stazioni ferroviarie che la rendono ben collegata con le principali città: la stazione di Burgdorf Buchmatt, quella di Burgdorf-Thun (linea S4/S44 della rete celere di Berna) e infine la stazione centrale.

I parchi naturali

Nella città di Burdorf e nelle aree limitrofe non sono presenti parchi naturali o aree protette di particolare interesse, poiché queste si concentrano maggiormente nell'area dei laghi di Thun.

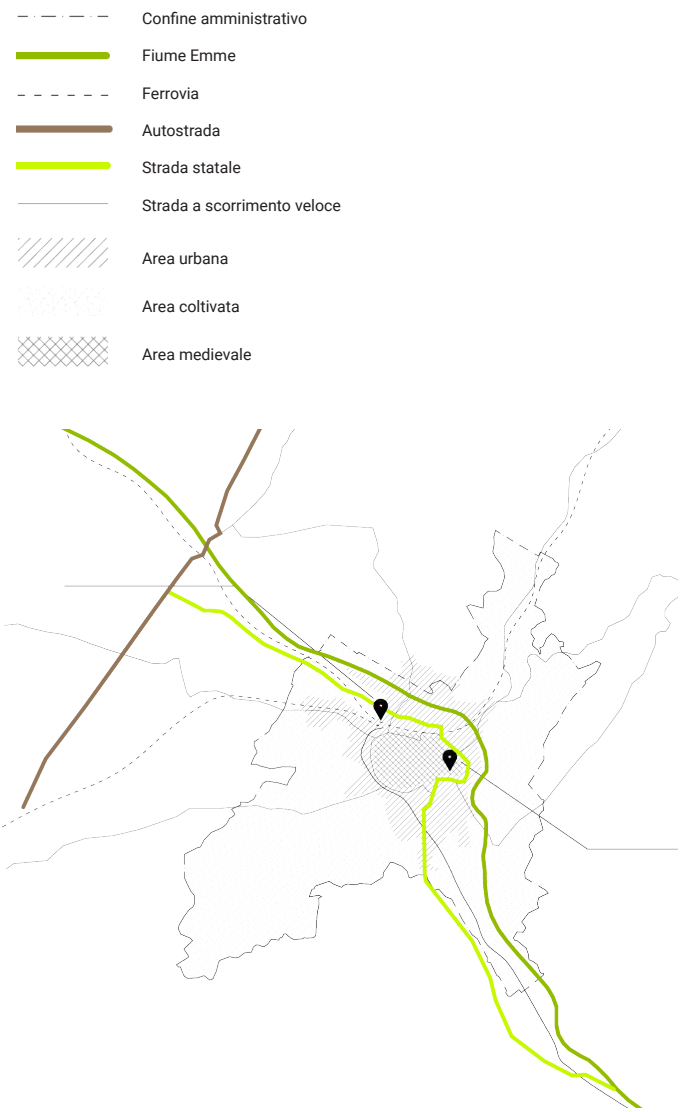


Figura 7: Schema rappresentante la città di Burgdorf.

Fonte: Produzione propria basata sull'osservazione delle cartografie ottenute da Google Earth.

1.2.2 Le analisi climatiche

L'architettura bioclimatica e il comfort ambientale

Il 29% del consumo mondiale di energia annuo è impiegato nelle abitazioni e negli edifici commerciali. L'85% di questa energia è prodotta da fonti non rinnovabili (petrolio, gas e carbone). Il consumo di energia non si limita alla fase d'uso degli edifici, bensì si estende alla produzione di materiali necessari alla realizzazione degli stessi, al trasporto, alla posa in opera e alla decostruzione finalizzata alla dismissione o al riciclo, dove questo è possibile. [1]

Una progettazione architettonica più sostenibile è uno degli strumenti utili alla riduzione dell'impatto ambientale dovuto al consumo di risorse rinnovabili e non rinnovabili. Cambiare il modo di "pensare" l'edificio è una responsabilità sociale dell'architetto che non può più ignorare l'impatto ambientale generato dal settore edilizio. Ogni progetto deve essere l'occasione per studiare sistemi abitativi e tecnologici, di-

[1] Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions. (2012). Journal of Consumer Policy, 35(1), 23–41.
[2] Spiazzi, F. (2010). Metodologie per la valutazione della sostenibilità nell'edilizia: analisi comparativa e applicazione all'Ospedale di Prato [Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali]. Università di Padova.

ventando esempi virtuosi, su cui fondare le basi di una nuova progettazione.
Risulta necessario lo studio e la progettazione dell'architettura bioclimatica che analizza le soluzioni tipologiche e le prestazioni dei sistemi tecnologici capaci di rispondere maggiormente alle caratteristiche ambientali e climatiche del sito, e che consentono di raggiungere le condizioni di benessere all'interno degli edifici.

L'architettura bioclimatica (bio, dal greco -bios, "che vive" cioè capace di adattarsi) è generata da una specifica metodologia di progettazione in grado di utilizzare l'apporto delle fonti energetiche ambientali, nel pieno rispetto dei climi locali, minimizzando l'uso di impianti meccanici, massimizzano l'efficienza degli scambi termici tra edificio e ambiente e infine garantendo il mantenimento delle condizioni di benessere e di funzionamento interno.[2]
Perciò l'analisi climatica assume un ruolo primario nella progettazione.

Il fine ultimo dello studio delle condizioni climatiche è quello di raggiungere il comfort ambientale dell'occupante all'interno dello spazio progettato.
Si definisce comfort ambientale quella particolare condizione di benessere determinata in funzione delle percezioni sensoriali di una persona in base alla temperatura, all'umidità dell'a-

ria, al livello di rumorosità e luminosità rilevati all'interno di un ambiente chiuso ed è ottenuta mediante un'attenta progettazione dell'involucro edilizio e degli impianti di condizionamento. Per definire il comfort ambientale è necessario analizzare la psicrometria locale.
La psicrometria è lo studio delle proprietà termodinamiche di miscela di aria e vapore acqueo. Il benessere termo-igrometrico dell'individuo può essere definito come "la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico" [3].
La Carta Bioclimatica Givoni-Milne mostra potenziali estensioni della zona di comfort interno di un edificio in base alle condizioni climatiche esterne prevalenti e alle caratteristiche progettuali dell'edificio come guadagni solari, utilizzo della massa termica interna o strategie di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione.
La Carta Bioclimatica, rappresentata sopra un diagramma psicrometrico, riporta i limiti delle strategie di raffrescamento e riscaldamento passive, includendo: la massa termica, il raffrescamento per evaporazione, la ventilazione naturale.

[3] Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale (EN ISO 7730:2006). (2016). UNI.
[4] PD: Psychrometric Chart. (2022). https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html
[5] \climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (n.d.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html

Temperatura di bulbo asciutto, "Tba": livello termico della massa umida [°C].

Umidità specifica "x": quantità di umidità presente in una massa d'aria [gv/kga].

Umidità relativa "UR%": grado igrometrico. Quantità di vapore acqueo presente in una massa d'aria in rapporto alla quantità d'acqua che può essere contenuta ad una data temperatura [%].

Entalpia specifica "h": contenuto di energia dato dalla sommatoria delle quote del carico sensibile e latente [kJ/kgK].

Attraverso il software Psychrometric Chart di Andrew Marsh [4], caricando i dati metereologici contenuti in un file .epw [5], è possibile visualizzare un grafico psicrometrico su cui è rappresentata la Carta Bioclimatica di Givoni-Milne.
Muovendo lo sguardo sull'asse verticale si osserva il variare dell'umidità assoluta x (gv/kga), fondamentale per realizzare la Carta Bioclimatica di Givoni.
Sull'asse orizzontale è possibile leggere i dati di temperatura assoluta T (°C), cioè di bulbo secco. Le curve rappresentano le percentuali di umidità relativa UR% (%), fino a raggiungere il valore del 100% che identifica la curva di saturazione. Infine, i segmenti diagonali rappresentano l'entalpia specifica h (kJ/kg), cioè il contenuto energetico posseduto dalla miscela di aria umida.
La metrica predefinita visualizzata quando si mostrano per la prima volta i dati della griglia è la distribuzione della frequenza di temperatura e umidità. Questo è essenzialmente il numero di punti dati univoci all'interno dell'area del grafico coperta da ciascuna cella della griglia. La gamma di colore blu mostra le ore in cui si verificano le condizioni psicometriche all'interno dei dati.
La concentrazione più o meno densa di tali punti su aree specifiche del grafico permette di scegliere le strategie progettuali da applicare all'edificio.

Diagramma Givoni: 1 gennaio - 31 marzo

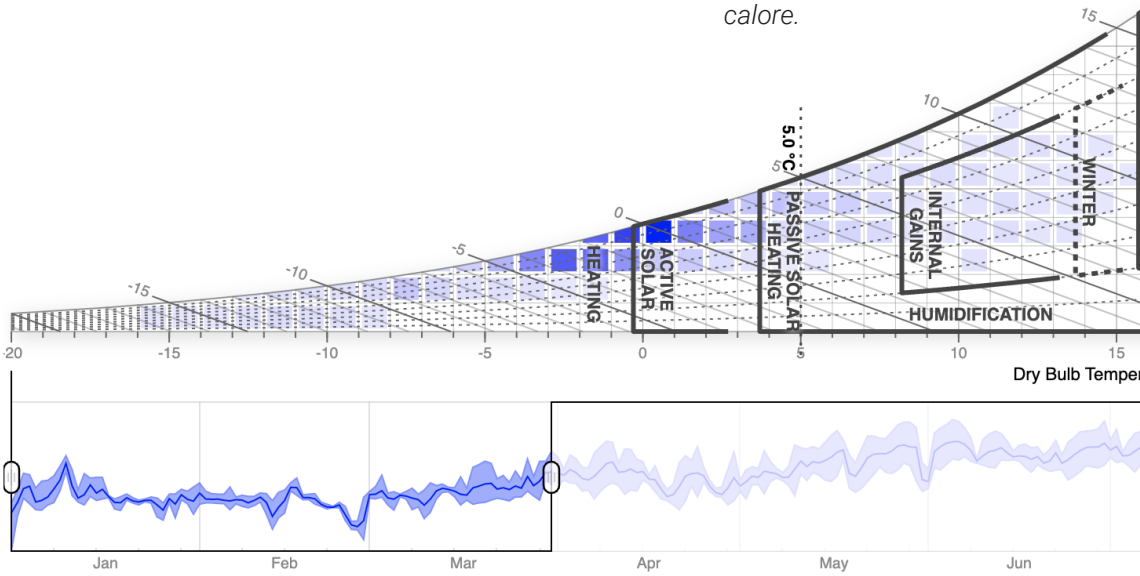
Le temperature più frequenti sono lontane dalla *comfort zone* e variano per lo più tra i -5 e i 5°C. Questo richiede l'utilizzo un impianto di riscaldamento integrato da sistemi solari attivi.
Il grafico mostra che è possibile impiegare anche sistemi di riscaldamento passivi.
I dati rilavati si trovano frequentemente in condizioni climatiche vicino alla curva di saturazione, con un'umidità relativa elevata.

Figura 8: Analisi dei dati climatici nei mesi di gennaio, febbraio e marzo con il Diagramma Givoni.

Fonte: Elaborazione mediante il software Andrew-marsha dei dati in formato .epw rilevati da "\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (n.d.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html".

ACTIVE SOLAR:
Sistema di riscaldamento a collettori solari termici ad aria o ad acqua che sfrutta l'apporto solare, trasferendo l'energia termica dapprima negli accumulatori e infine nell'ambiente attraverso i sistemi di distribuzione.
Esempi: pannelli solari, cellule fotovoltaiche e centrali solari.

HEATING:
Sistema di riscaldamento tradizionale che impega un gruppo termico e un sistema di disitribuzione per raggiungere i corpi scladanti .
Esempi: caldaie e pompe di calore.



PASSIVE SOLAR HEATING:
Sistemi di riscaldamento che sfruttano i fenomeni di irragiamento, conduzione e convezione naturale integrati all'edificio, composti da un elemento di captazione e una massa termica.
Esempi: muri radianti, muri solari ad acqua, parete di Trombe, roof pond e serre.

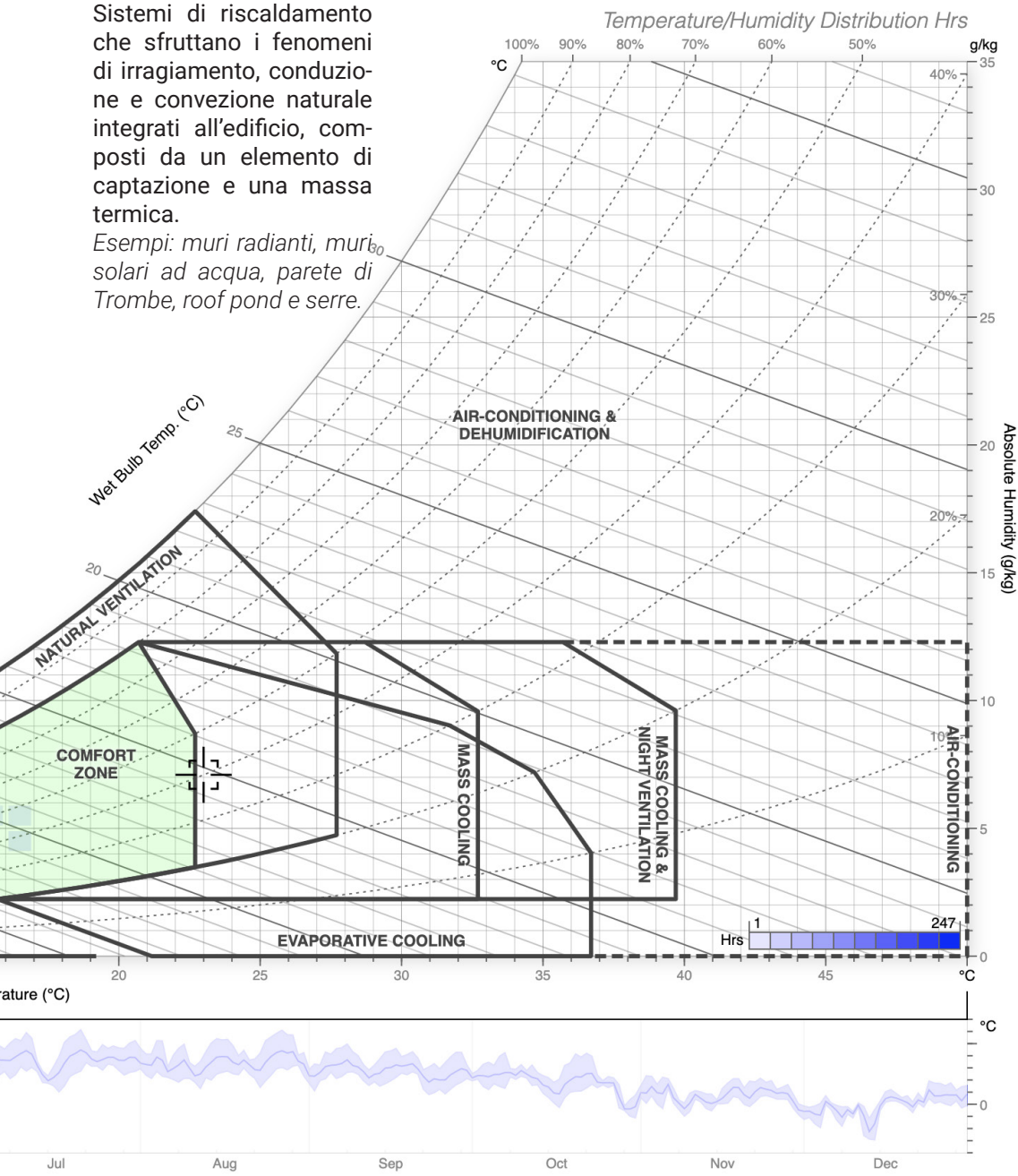


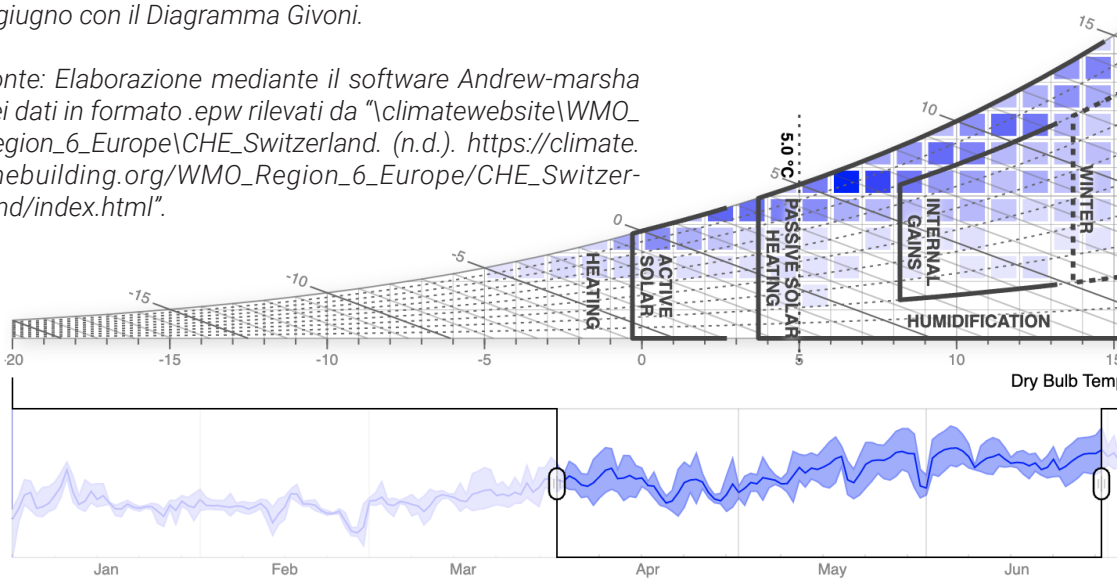
Diagramma Givoni: 1 aprile - 30 giugno

Nel seguente diagramma, che riporta i dati relativi ai mesi di aprile, maggio e giugno, si nota che le condizioni climatiche naturali rispecchiano, anche se con una frequenza minore, le condizioni interne di comfort zone.
Come si evince dal diagramma precedente, anche in questo scenario è necessaria la presenza di sistemi solari attivi e passivi. Inoltre, il grafico illustra come lo sfruttamento degli *internal gains* può giovare alle condizioni interne.
La ventilazione può risultare utile al fine di deumidificare e raffrescare, motivata dall'avvicinarsi ai mesi estivi.

INTERNAL GAINS:
Rappresentano il calore generato nello spazio climatizzato dalle sorgenti interne diverse dal sistema di riscaldamento, tra cui: gli apporti dovuti al metabolismo degli occupanti, al calore generato dalle apparecchiature elettriche e dagli apparecchi di illuminazione.

Figura 9: Analisi dei dati climatici nei mesi di aprile, maggio e giugno con il Diagramma Givoni.

Fonte: Elaborazione mediante il software Andrew-marsha dei dati in formato .epw rilevati da "\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (n.d.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html".



COMFORT ZONE:
Sei variabili ambientali influenzano il benessere termico:

- temperatura dell'aria;
- velocità dell'aria;
- temperatura media radiante;
- umidità relativa.
- attività svolta;
- resistenza termica dell'abbigliamento.

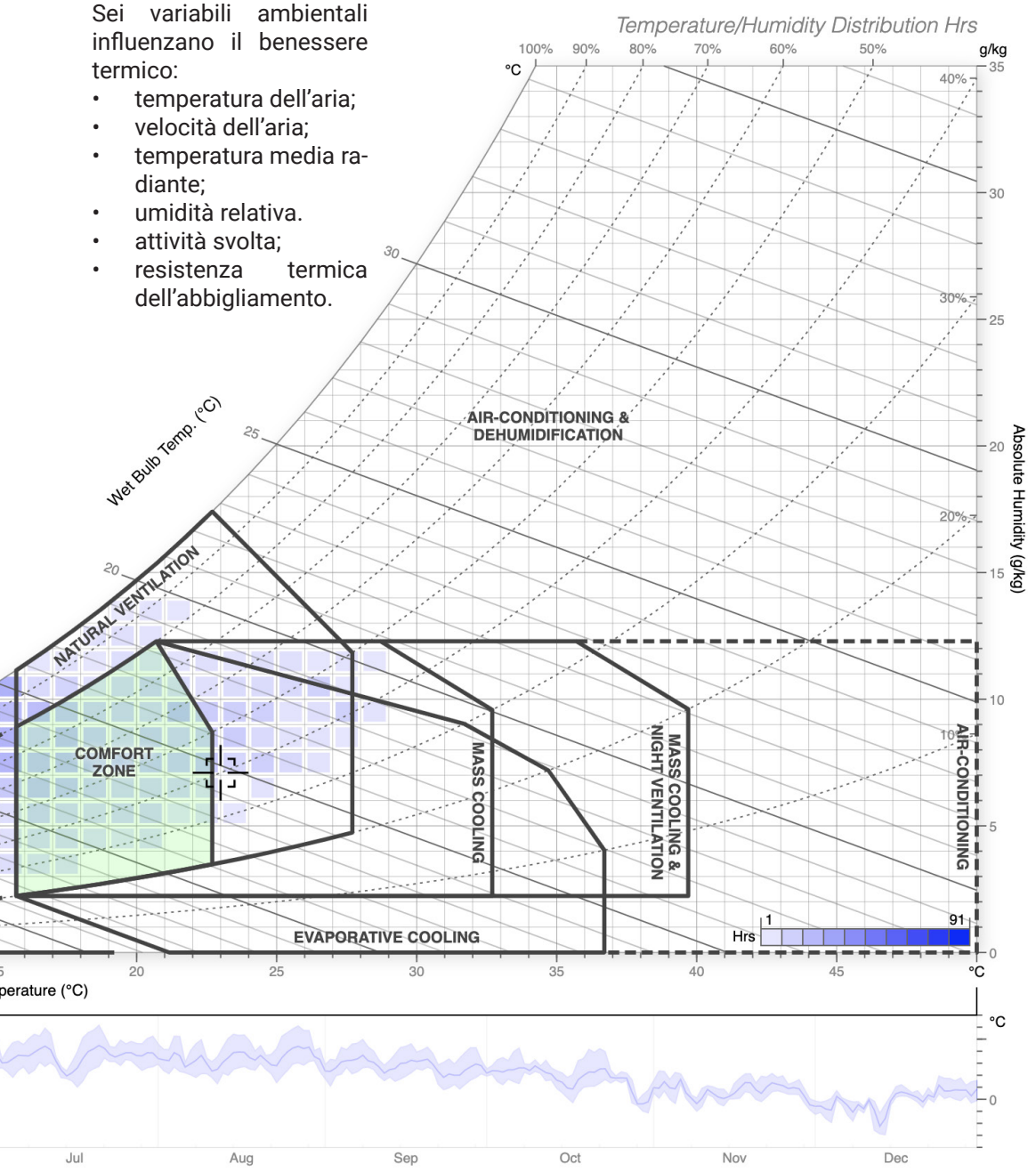


Diagramma Givoni: 1 luglio - 30 settembre

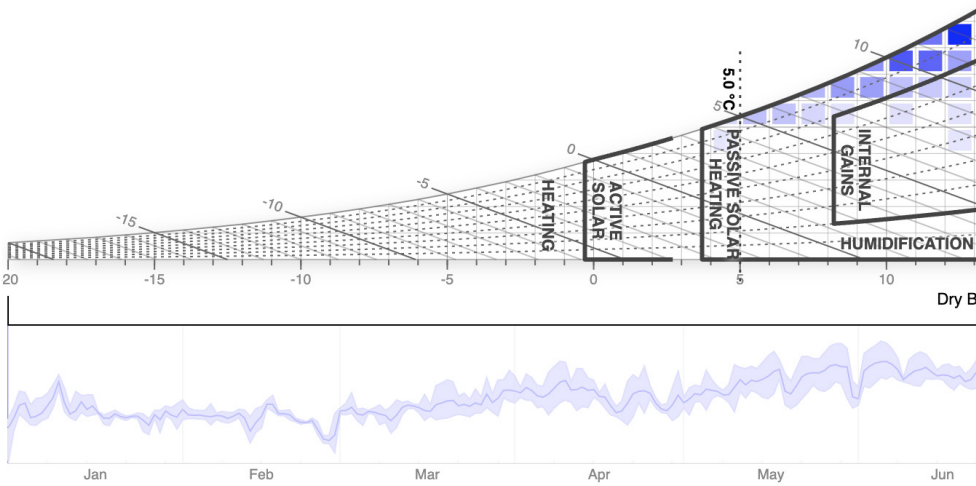
Durante i mesi estivi, una frequenza rilevante dei dati climatici rientra nell'area della *comfort zone* ma rimane necessario lo sfruttamento dei sistemi di riscaldamento solare passivo.
Quando la temperatura supera i 16°C e l'umidità relativa supera il 20%, è consigliato l'uso della ventilazione naturale. In alternativa è possibile utilizzare i sistemi di *mass cooling* e di *evaporative cooling*.

Figura 10: Analisi dei dati climatici nei mesi di luglio, agosto e settembre con il Diagramma Givoni.

Fonte: Elaborazione mediante il software Andrew-marsha dei dati in formato .epw rilevati da "\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (n.d.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html".

MASS COOLING:
È lo sfruttamento dell'inerzia della massa termica di alcune componenti dell'edificio che genera uno sfasamento nella trasmissione del calore in un ambiente interno, rilasciando calore nelle ore notturne, quando è più facilmente gestibile con sistemi passivi, evitando picchi di surriscaldamento durante il giorno.

NATURAL VENTILATION:
La ventilazione naturale fornisce aria fresca a un ambiente per mezzo di forze passive come la velocità del vento o la differenza di pressione interna ed esterna.



EVAPORATIVE COOLING:
Il raffreddamento evaporativo è un processo che utilizza l'effetto dell'evaporazione come dissipatore di calore naturale. Il calore sensibile dell'aria viene assorbito per essere utilizzato come calore latente necessario per far evaporare l'acqua.

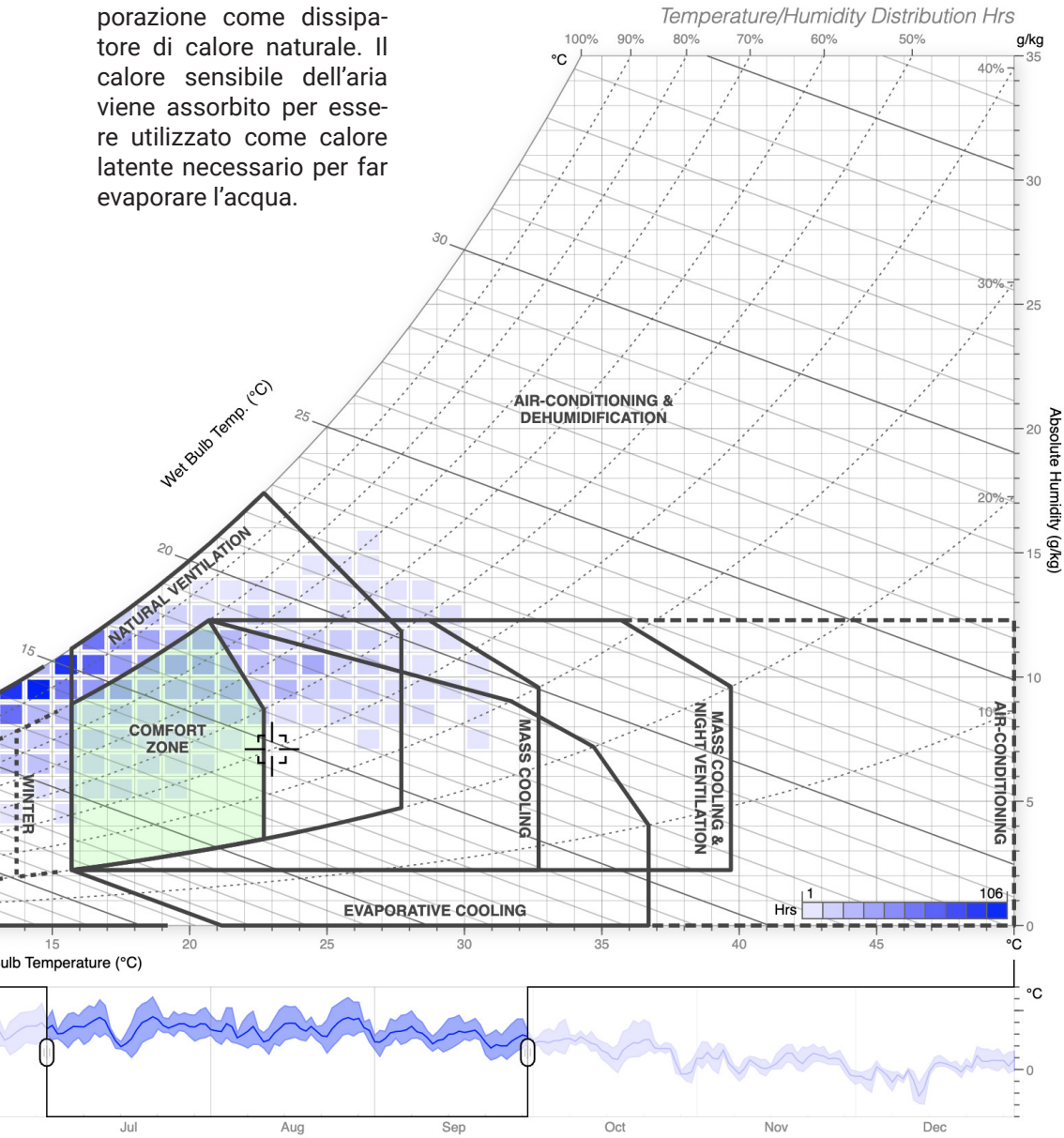
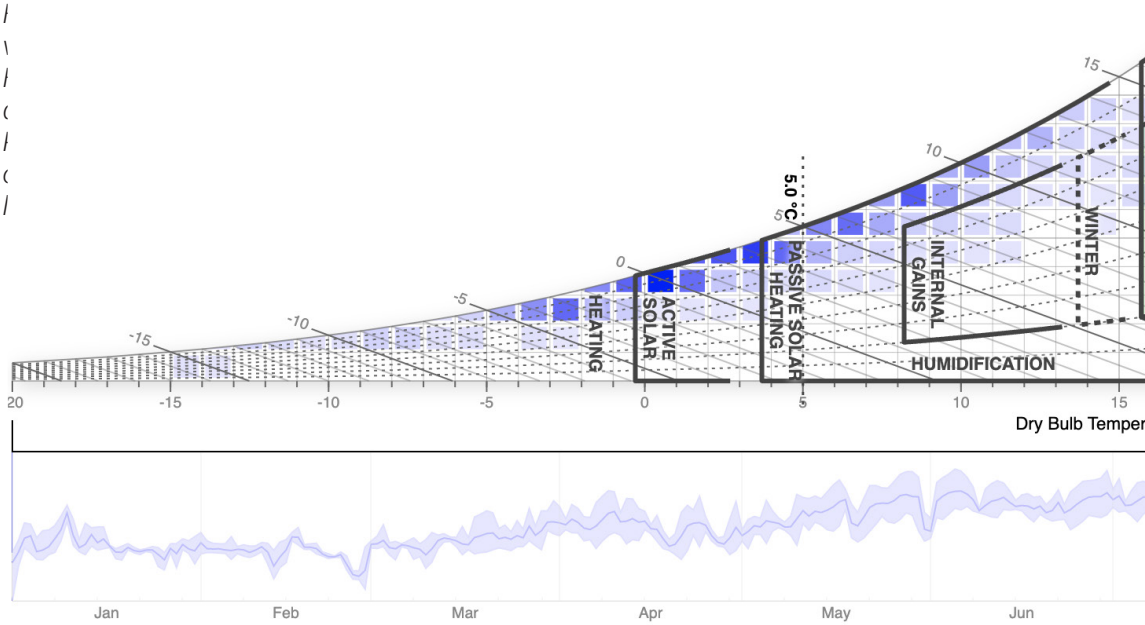
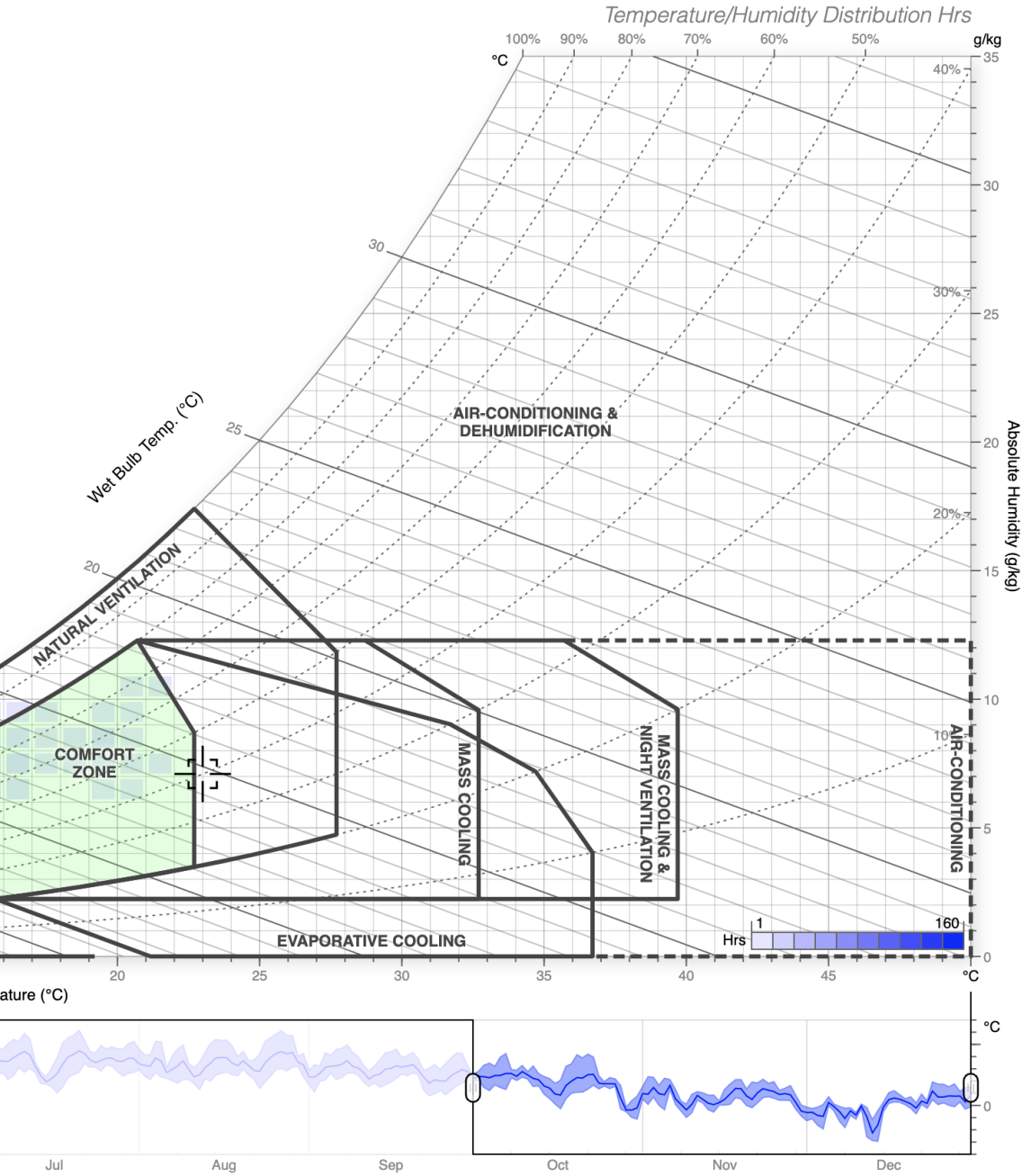


Diagramma Givoni: 1 ottobre - 31 dicembre

Nei mesi di ottobre, novembre e dicembre, si osserva nel diagramma come, a causa delle basse temperature ed elevata umidità relativa, la presenza di sistemi solari attivi e passivi sia necessaria integrata ai sistemi di riscaldamento tradizionali. Questo schema illustra caratteristiche similari a quello relativo ai mesi di gennaio, febbraio e marzo.

Figura 11: Analisi dei dati climatici nei mesi di ottobre, novembre e dicembre con il Diagramma Givoni.
Fonte: Elaborazione mediante il software Andrew-marsha dei dati in formato .epw rilevati da "\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (n.d.). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html".




Temperature/Humidity Distribution Hrs
100%
90%
80%
70%
60%
50%
g/kg
°C
40%
30%
30%
25
20%
20
15
10
10
5
0
Absolute Humidity (g/kg)
Wet Bulb Temp. (°C)
AIR-CONDITIONING &
DEHUMIDIFICATION
NATURAL VENTILATION
COMFORT
ZONE
MASS COOLING
MASS COOLING &
NIGHT VENTILATION
AIR-CONDITIONING
EVAPORATIVE COOLING
1
160
Hrs
20
25
30
35
40
45
°C
ature (°C)
°C
0
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec

Le *warming stripes* del territorio svizzero

Le *warming stripes* [6] sono elementi grafici di visualizzazione dei dati (Figura 12) che utilizzano una serie di strisce colorate ordinate cronologicamente per rappresentare visivamente le tendenze della temperatura a lungo termine.

I dati storici prodotti dall'Unità di Ricerca Climatica (CRU) dell'Università dell'East Anglia, graficizzati nelle *warming stripes*, aiutano a comprendere le condizioni climatiche attuali, sensibilizzando l'attenzione verso il cambiamento climatico e il surriscaldamento globale.
Osservando il grafico relativo al territorio del Canton di Berna (Figura 12), viene mostrato un incremento di circa il 70% della temperatura annuale media dal 1901 (4,8°C) al 2021 (8,1°C).

Il diagramma a barre in figura 13 illustra le temperature superiori e inferiori alla media registrate dal 1864 al 2021 secondo lo studio di Ed Hawkins. [7]
I dati sensibilmente preoccupanti riguardano gli ultimi 30 anni.

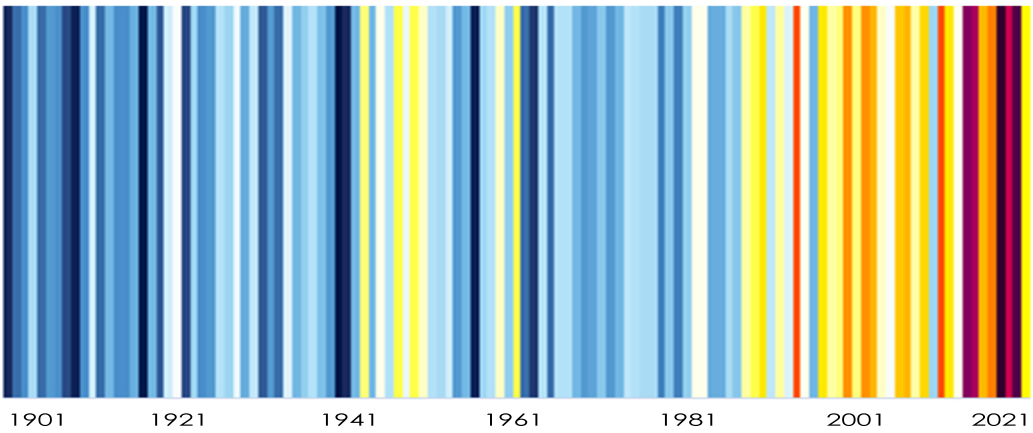
Figura 12: Le warming stripes del canton di Berna.

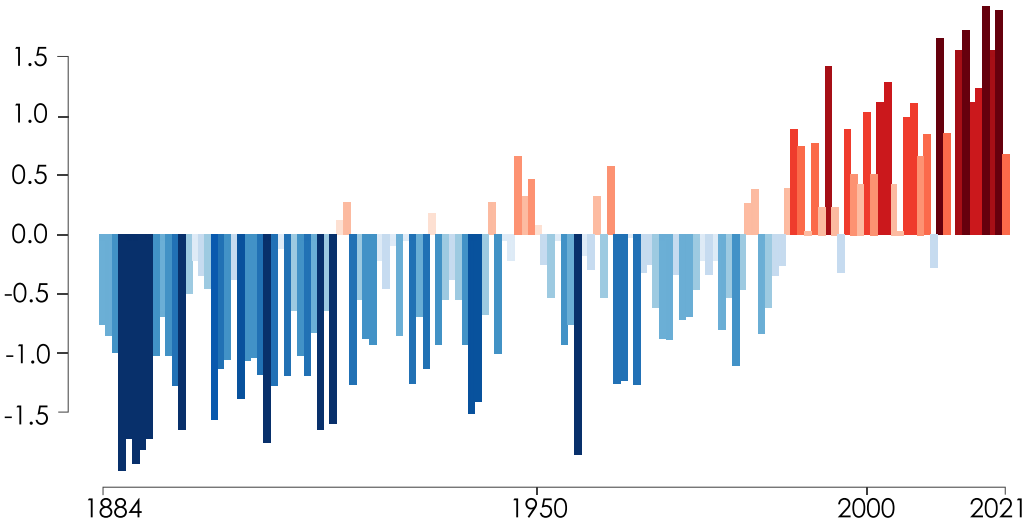
Fonte: World Bank Climate Change Knowledge Portal. (2020). https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/switzerland

Figura 13: Variazione della temperatura media annuale in Svizzera.

Fonte: University of Reading. (2021). ShowYourStripes. showyourstripes.info. https://showyourstripes.info/s/globe

[6] University of Reading. (2021). ShowYourStripes. showyourstripes.info. https://showyourstripes.info/s/globe
[7] Ed Hawkins, climate scientist, University of Reading. http://www.met.reading.ac.uk/%7Eed/home/index.php


1901
1921
1941
1961
1981
2001
2021


1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
1884
1950
2000
2021

Le fonti dei dati climatici

Lo studio sugli aspetti climatici è stato effettuato attraverso la selezione di dati rilevati dalla stazione termoigropluvioanimetrica di Langnau nell'Emmental situata a 736 m s.l.m. come sito rappresentativo per i territori dell'Emmental, rilevati tra il 2012 e il 2017.
Nelle pagine successive è possibile osservare l'analisi delle temperature medie mensili, delle precipitazioni, del vento e delle ore di luce.
Alcuni grafici sono stati realizzati con il software Ladybug per Grasshopper sulla base dei dati .epw impiegati nell'elaborazione dei diagrammi Givoni.

Le temperature medie mensili

Il clima dell'Emmental è moderatamente continentale. Nella stagione calda si raggiungono picchi di 30°C tra il mese di luglio e quello di agosto, mantenendo una temperatura media massima tra i 19°C e 24°C. La stagione fredda mostra temperature massime giornaliere medie inferiori ai 6°C e minime tra gli 0°C e -4°C. Vengono raggiunti picchi di -10°C. (Figura 14)

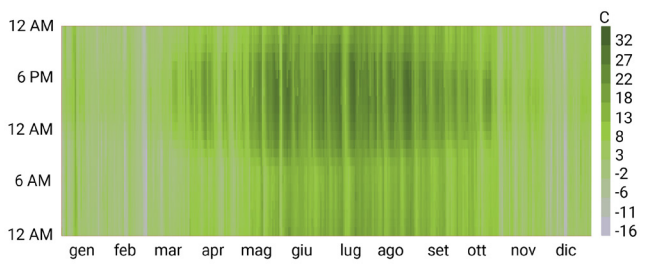


Figura 14: Grafico rappresentante la temperatura di bulbo secco della stazione termoigropluvioanimetrica di Lagnau.

Fonte: dati .epw, elaborazione cDn il software Ladybug per Grasshopper.

Le precipitazioni medie mensili

In figura 15 è riportato il grafico delle precipitazioni medie mensili da cui si può constatare come il picco delle precipitazioni si registra nei mesi primaverili di maggio e giugno, raggiungendo mediamente il valore di 100 mm. Durante l'arco dell'anno, i rovesci si mantengono ad una media superiore ai 50 mm.

Per quanto riguarda le nevicate, queste si presentano maggiormente durante i mesi di novembre, dicembre, gennaio e febbraio mantenendo una media mensile tra i 25 e i 117 mm e raggiungendo picchi massimi di 275 mm. Il periodo dell'anno senza neve dura 7,5 mesi. La linea tratteggiata indica la pioggia media corrispondente (Figura 16).

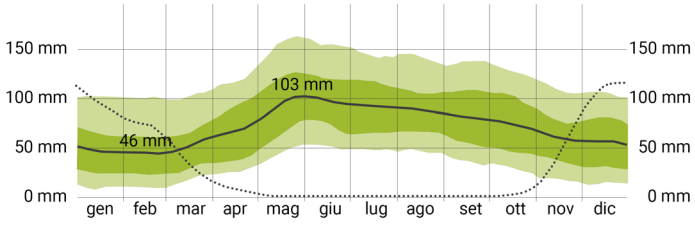


Figura 15: Precipitazioni medie mensili.
Fonte: Bern Climate, Weather By Month, Average Temperature (Switzerland) - Weather Spark. (2022).

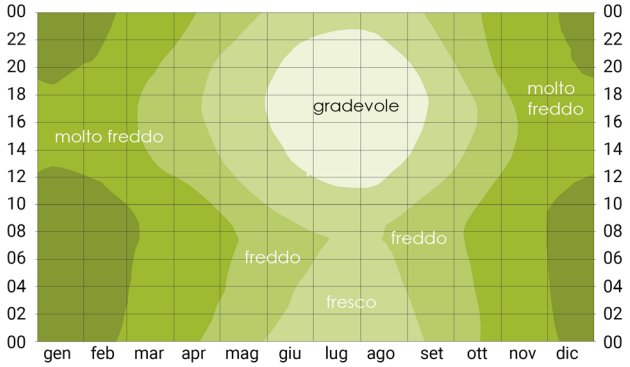


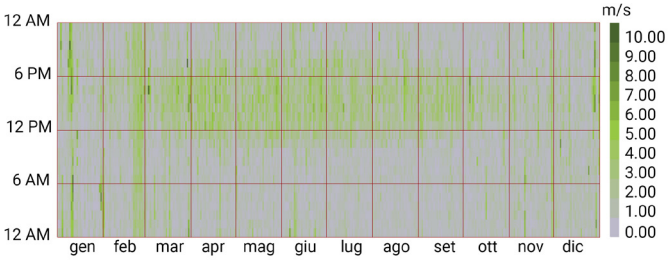
Figura 16: Percezione delle temperature.

Fonte: Bern Climate, Weather By Month, Average Temperature (Switzerland) - Weather Spark. (2022).

La velocità e direzione del vento

In figura 17 è rappresentata la velocità media mensile del vento. Si osserva come la velocità media massima del vento si mantenga attorno a 10 km/h. Nei periodi invernali possono esserci picchi che raggiungono i 20 km/h.

La direzione prevalente del vento da aprile a novembre è est, come si può osservare dalla rosa dei venti ottenuta dalla stazione meteo Hasle-Ruegsau (Figura 18).



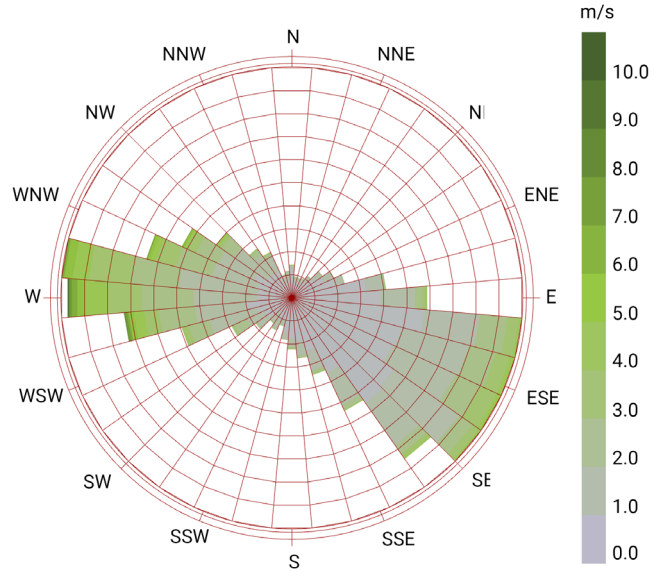


Figura 17: Grafico rappresentante la velocità del vento.

Figura 18: Grafico rappresentante la direzione e la velocità del vento.

Fonte: Dati .epw della stazione termoigropluvioanimetrica di Lagnau, elaborati con il software Ladybug per Grasshopper.

Le ore di sole

Il grafico 19 definisce le ore di luce diurna e notturna segnalando il punto di crepuscolo, nell'arco dell'anno 2021.
Durante i mesi di maggio, giugno e luglio le ore diurne raggiungono circa 16 ore il 21 giugno. Nei mesi invernali le ore diurne si riducono a circa 8 ore, come rilevato il 21 dicembre.

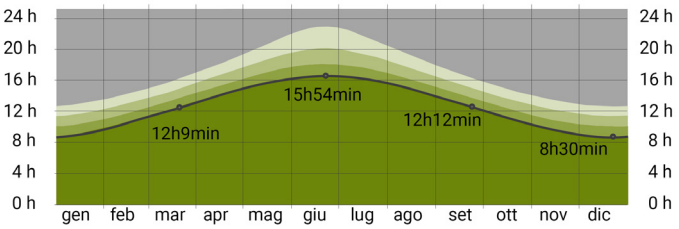


Figura 19: Grafico rappresentante le ore di luce nel 2021.

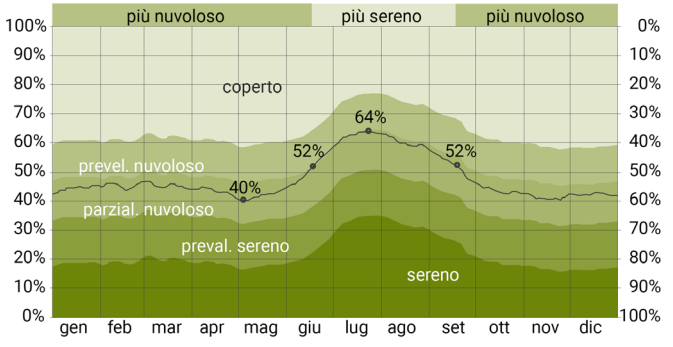


Figura 20: Grafico rappresentate la nuvolosità.

Fonte: Bern Climate, Weather By Month, Average Temperature (Switzerland) - Weather Spark. (2022)

Considerazioni sulle analisi climatiche

Le analisi climatiche precedentemente descritte sono un punto di partenza per comprendere quali strategie progettuali si possono inserire nel progetto.
Lo studio effettuato ha confermato le aspettative sulla tipologia di clima presente a Burgdorf.
Le temperature sono molto fredde nella stagione invernale e, come suggeriscono i diagrammi di Givoni, il riscaldamento non è richiesto solamente nel periodo più caldo dell'anno. Inoltre, i dati statistici .epw elaborati dal software di Andrew Marsh hanno permesso di evidenziare quali accortezze sono necessarie per perseguire l'obiettivo di raggiungere un'architettura bioclimatica. È emerso che, a causa del clima molto rigido, la presenza di un impianto di riscaldamento tradizionale è d'obbligo. Però, per raggiungere il comfort termico possono essere utilizzati tecniche e sistemi come quelli solari attivi e passivi, la ventilazione naturale e il "mass cooling".
È stata osservati il regime pluviometrico di Burgdorf. Le precipitazioni sono costanti per tutto l'arco dell'anno e questo fattore si potrebbe sfruttare a favore di un sistema di raccolta delle acque per limitare i consumi e i prelievi da fonte di acquedotto.

Infine, dallo studio del vento effettuato con l'elaborazione dei dati .epw con Ladybug, si è dedotto che le due direzioni delle correnti maggiori sono provenienti da Sud-Est e da Ovest e si alternano nell'arco dell'anno. Tuttavia, data la loro scarsa velocità hanno poca influenza sulle strategie progettuali, quindi si esclude la produzione di energia da fonte rinnovabile eolica.

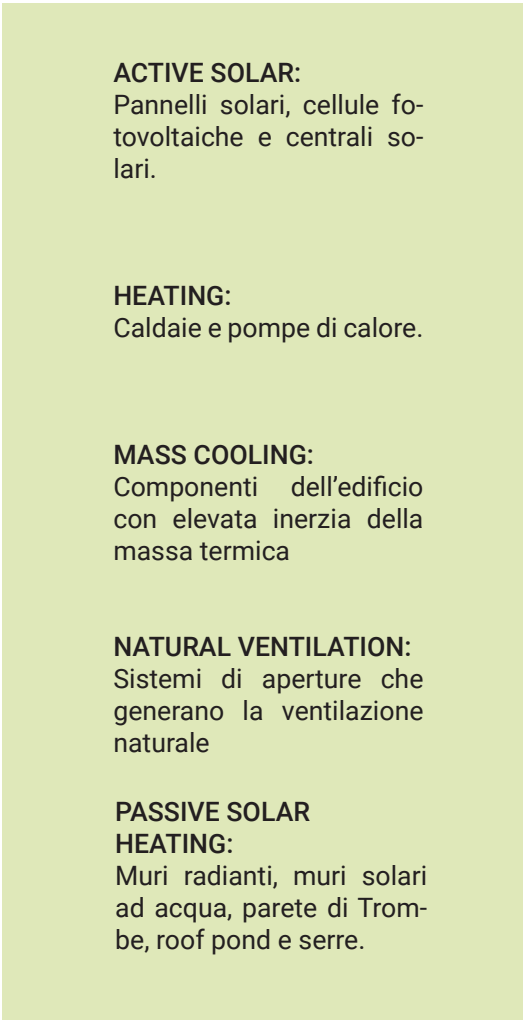


Figura 21: Strategie bioclimatiche impiegabili nel caso studio della Circular Tower.

Fonte: Elaborazione prorpia.

1.2.3 Analisi cartografica

Il tessuto urbano

Partendo da un'analisi sulla tipologia del tessuto urbano che caratterizza il circondario dell'area di progetto, è possibile affermare che il nuovo edificio verrà realizzato in un'area di incontro tra il costruito residenziale e quello industriale.
La città di Burgdorf si sviluppa attorno al centro storico, dove è sito il castello, per poi espandersi con un tessuto residenziale a ovest. Da quest'ultimo si innesta la zona industriale, nella quale sono presenti aziende e grossi capannoni.
Il circondario della città è costituito da zone boschive ed estese distese di campi agricoli e prati.

Figura 22: Cartografia rappresentante il tessuto urbano scala 1:10'000

Fonte: Elaborazione propria basata sul PRG comunale di Burgdorf.

La viabilità

Successivamente è stata analizzata a una scala ravvicinata la viabilità e gli accessi all'area di progetto.
Grazie agli ottimi collegamenti ferroviari in tutta la Svizzera, è possibile raggiungere Burgdorf in treno.
La stazione centrale di Burgdorf è distante 700 metri dall'area oggetto si trasformazione. La fermata più vicina degli autobus del servizio cittadino è invece a 300 metri.
La zona progettuale beneficia di un parcheggio per automobili a 100 metri, dotato anche di alcune colonnine per la ricarica elettrica dei mezzi.
Infine, la presenza di una pista ciclabile in ottime condizioni passante davanti al luogo di progetto rende quest'ultimo facilmente raggiungibile a piedi, in bici.

Figura 23: Cartografia rappresentante il tessuto urbano scala 1:5'000.

Fonte: Elaborazione propria.

L'area di progetto

A una scala quasi di *masterplan*, si notano le dimensioni ridotte dell'area edificabile di progetto, racchiusa tra gli alberi e le loro chiome, il basso fabbricato in legno e la pista ciclabile.

Si può affermare che la zona progettuale è cinta a nord dal corso d'acqua e a sud dalla ferrovia, ma nonostante questo è ben collegata con il resto della città.

Essendo attraversata solamente da una strada di piccole dimensioni destinata alla mobilità dolce, l'area risulta adatta alle famiglie venendo meno il traffico veicolare veloce.

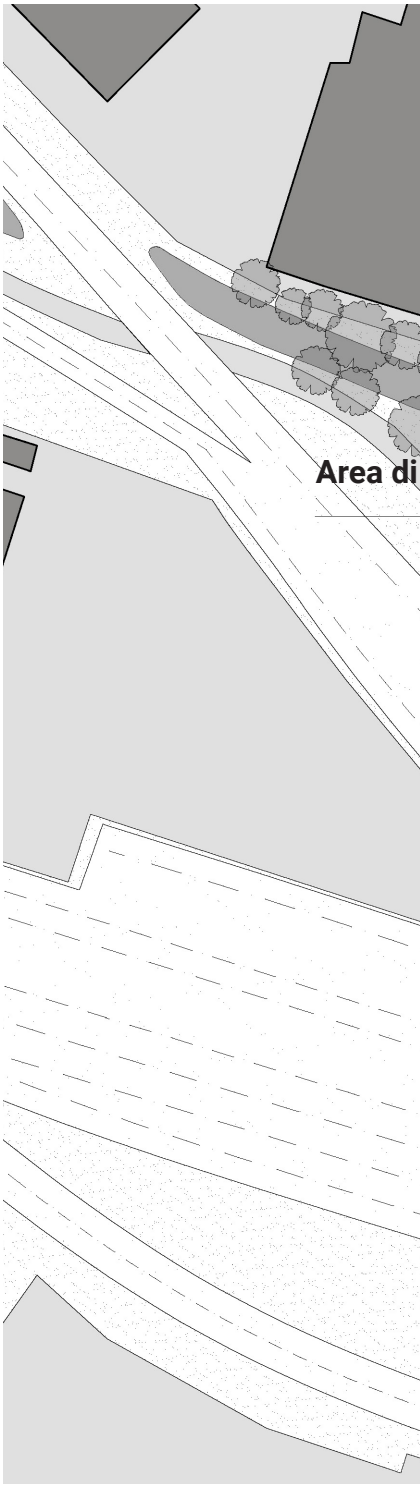
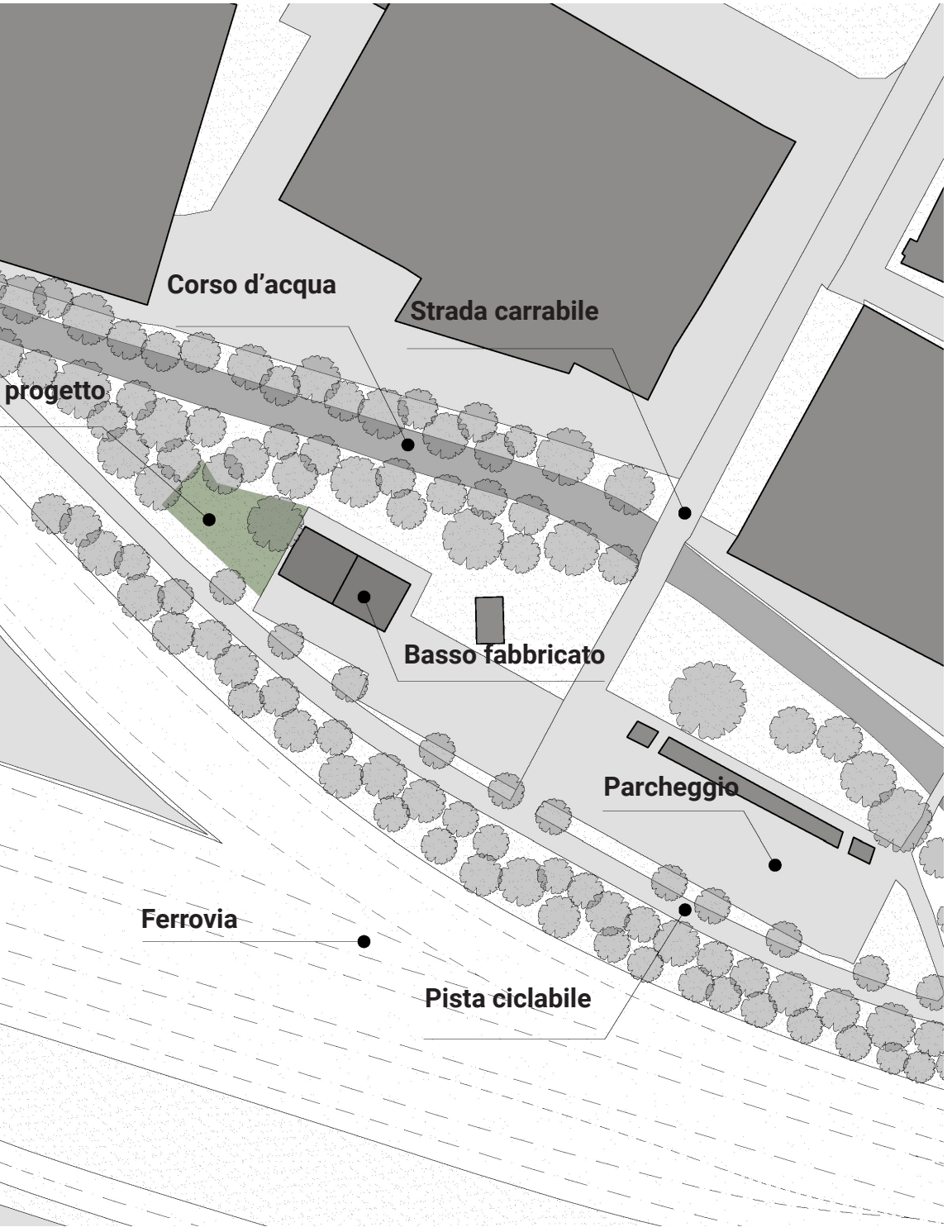


Figura 24: L'area di progetto.

Fonte: elaborazione propria basata sul PRG comunale e sui dati del bando di concorso.


Corso d’acqua
Strada carrabile
progetto
Basso fabbricato
Parcheggio
Ferrovia
Pista ciclabile

Studio dell'ombreggiamento

L'analisi dell'ombreggiamento è stata effettuata nei giorni dei solstizi d'estate ed inverno e in quelli degli equinozi di primavera e autunno, alle ore 12 per valutare e confrontare le porzioni di superficie illuminate e quelle in ombra a causa degli ostacoli presenti in loco, sopperendo alle lacune della maschera d'ombra ottenuta tramite il software PVGIS.
Infatti, la maschera d'ombra (Figura 25) riporta unicamente l'ombreggiamento dovuto da elementi topografici del territorio come ad esempio dalle catene montuose.

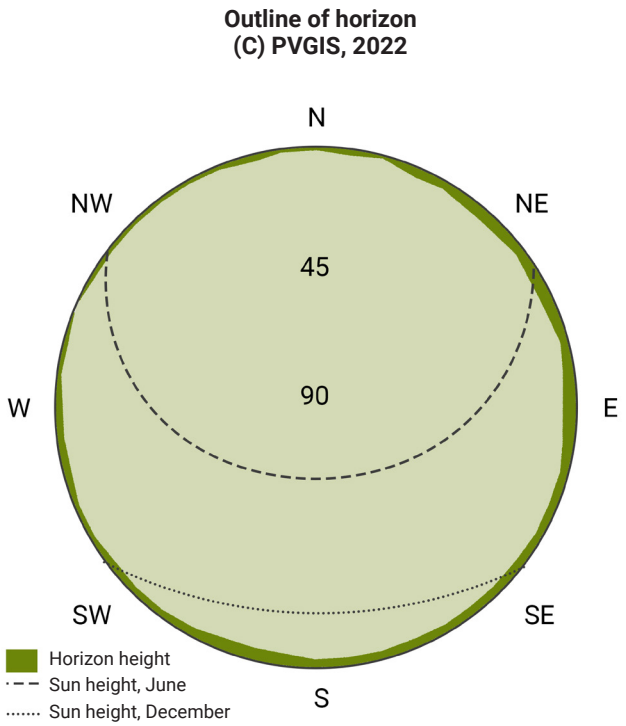


Figura 25: La maschera d'ombra dell'area di progetto.

Fonte: PVGIS.

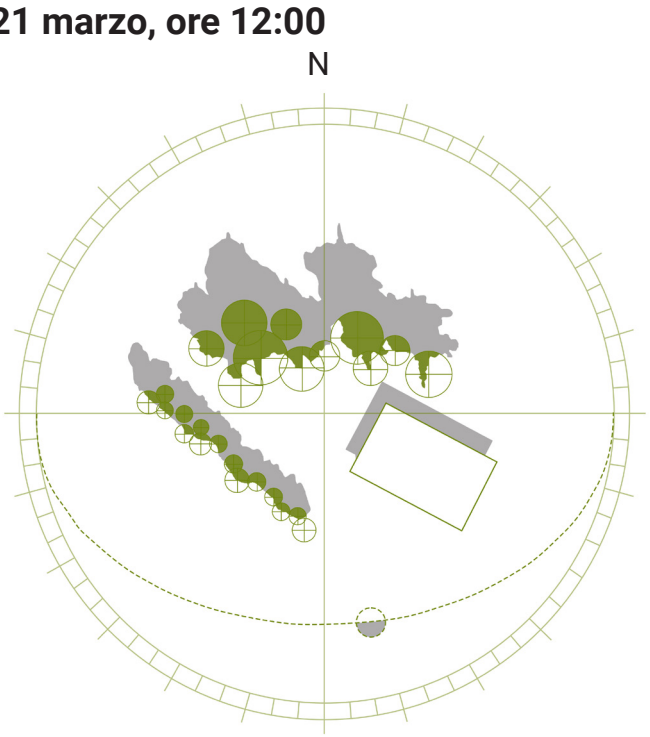


Figura 26: Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 marzo ore 12:00, riportato in una planimetria schematica. Gli ostacoli producono un ombreggiamento che non influisce sulla luminosità dell'area di progetto.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software Revit.

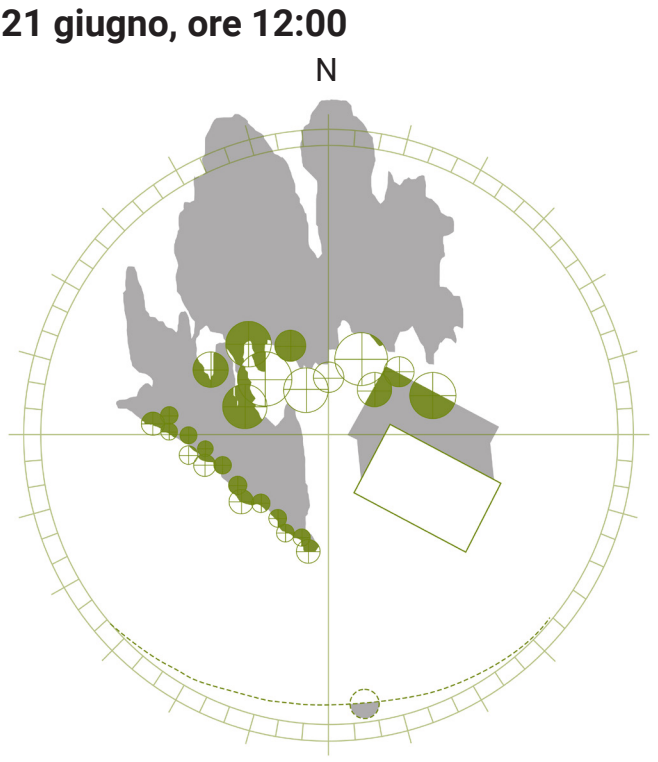


Figura 27: Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 giugno ore 12:00, riportato in una planimetria schematica. Gli ostacoli non producono un ombreggiamento significativo.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software Revit.

21 settembre, ore 12:00

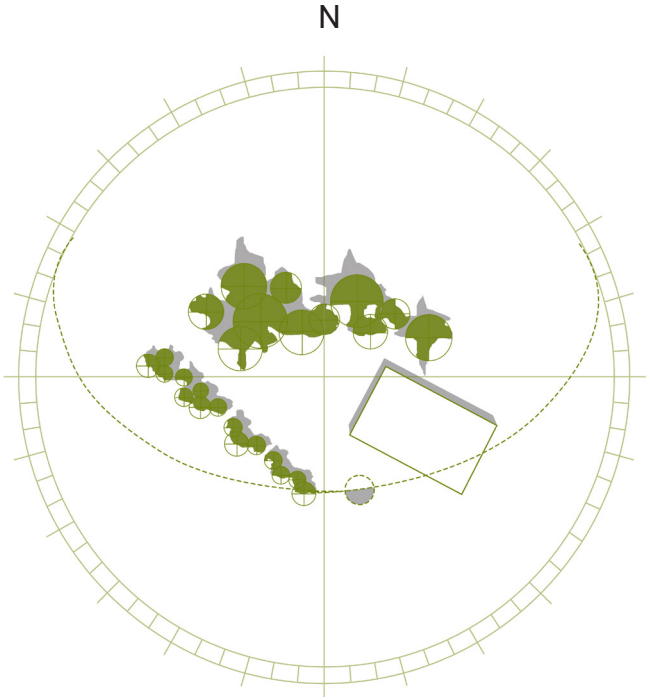


Figura 28: Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 settembre ore 12:00, riportato in una planimetria schematica. L' ombreggiamento è similare alle condizioni del 21 marzo.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software Revit.

21 dicembre, ore 12:00

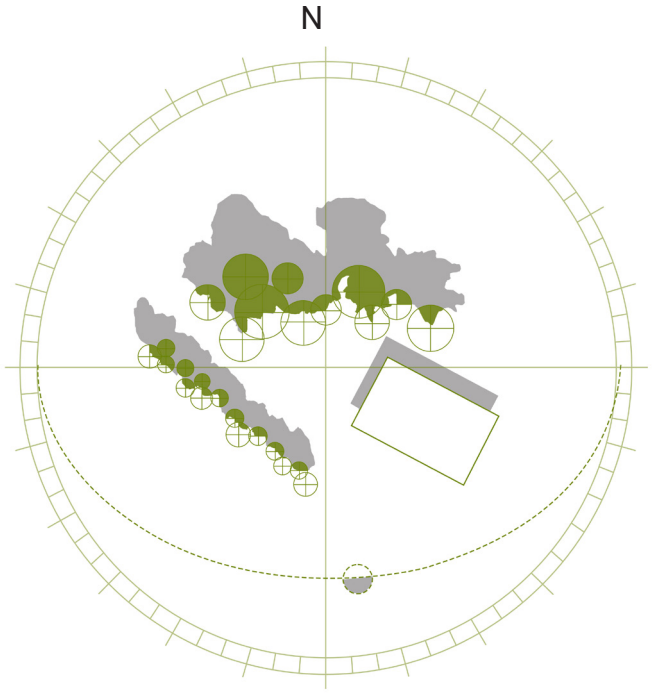


Figura 29: Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 dicembre ore 12:00, riportato in una planimetria schematica. Il filari di alberi presente a Sud riescono a produrre ombreggiamento a causa della ridotta altezza del sole.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software Revit.

Considerazioni

Gli ostacoli più rilevanti, alberi con fusto alto circa 10-15 metri, si dispongono perimetralmente all'area di progetto in posizione nord-ovest, nord e nord-est. Per questo motivo l'ombreggiamento prodotto dagli ostacoli risulta essere minimo.

Il basso fabbricato di legno adiacente all'area di progetto, la ferrovia posta a una quota maggiore e la vegetazione che la nasconde non risultano avere un impatto notevole.

Inoltre, la torre avente altezza di 30 metri, disposta su un asse Est-Ovest e avente il fronte principale a Sud, non sarà mai in condizioni di ombra poiché anche durante il periodo invernale, dove il sole raggiunge un altezza inferiore rispetto alle altre stagioni, l'altezza degli ostacoli a sud è trascurabile.

Analisi SWOT

L'analisi SWOT ha permesso di identificare i punti di forza, di debolezza, le opportunità e le minacce dell'area di progetto, consentendo una corretta pianificazione strategica.

Tra i punti di forza è possibile identificare un'abbondante vegetazione ad alto fusto che permette alla Circular Tower di inserirsi in un contesto naturale. Il lotto oltre a essere ben illuminato durante l'intero arco annuale, si affaccia su una pista ciclabile. Il collegamento carrabile è effettuato mediante una strada di accesso connessa ad un parcheggio con colonnine per la ricarica dei mezzi elettrici, nei pressi del lotto. In tal modo non vi è traffico carrabile di fronte all'edificio, rendendo l'area sicura.

L'area di progetto offre potenzialmente, in direzione Sud-Est, ad un'altezza tale da superare il dislivello occupato dalla ferrovia, una piacevole vista sulla collina e sul castello di Burgdorf, ottimale per la creazione di un punto panoramico. A Nord, il lotto è delimitato da un corso d'acqua utilizzabile per il ruscellamento delle acque piovane.

Una connotazione negativa dell'area è rappresentata dalla sua dimensione ridotta e irregolare, in prossimità di una preesistenza di basso pregio. Questo può incidere sulla gestione del cantiere e sulla realizzazione delle strutture di fondazione.

Figura 30: Tabella dell'analisi SWOT.

Fonte: Elaborazione propria.

INTERNE

PUNTI DI FORZA

Vegetazione abbondante

Vicinanza al fiume

Vicinanza al parcheggio con colonnine elettriche per ricarica dei mezzi

Ottima illuminazione naturale

Affaccio sulla pista ciclabile

Assenza di traffico carrabile

DEBOLEZZE

Dimensioni ridotte dell'area

Perimetro irregolare dell'area

Poco spazio per effettuare scavi di fondazione

ESTERNE

OPPORTUNITA'

Percorsi carrabili limitrofi

Vicinanza al corso flulviale

Vista sulla collina e sul castello di Burgdorf

MINACCE

Clima rigido

Vicinanza alla ferrovia

Vicinanza ad un basso fabbricato in cattive condizioni

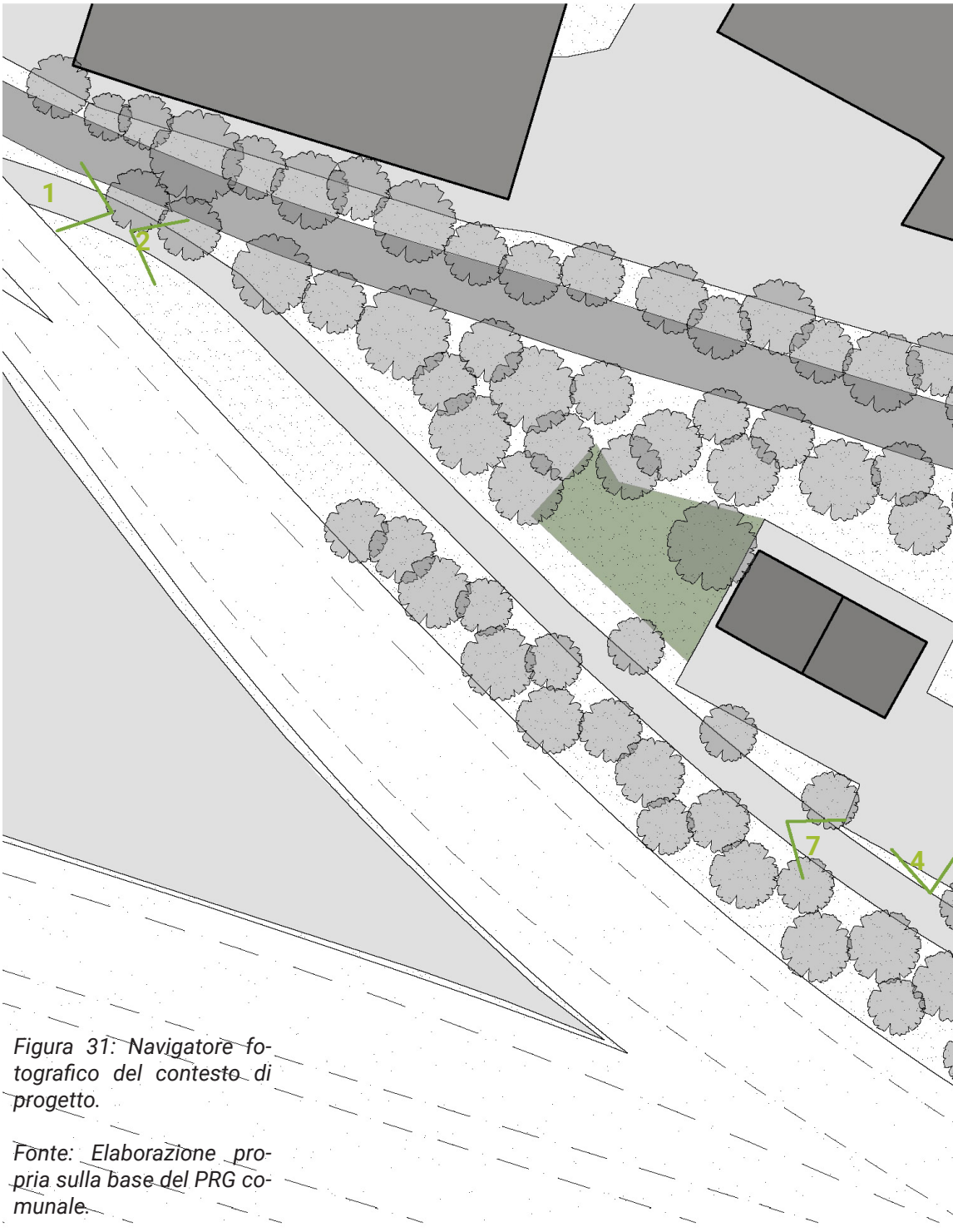
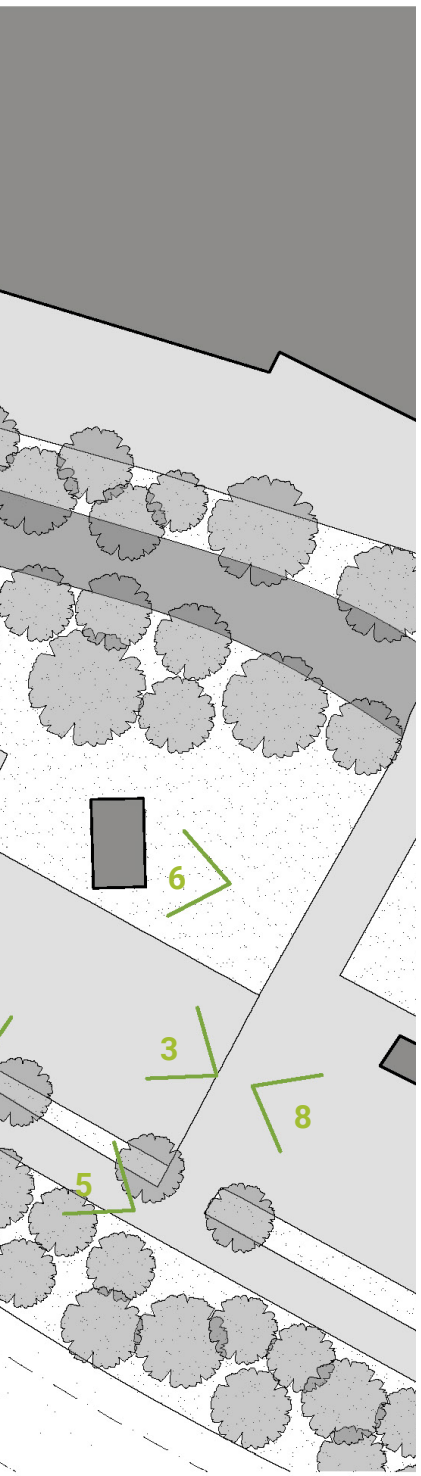


Figura 31: Navigatore fotografico del contesto di progetto.

Fonte: Elaborazione propria sulla base del PRG comunale.



1.2.4 Sopralluogo

Gli elementi naturali

Il sopralluogo presso il sito di progetto è stato effettuato in data 10 giugno 2022, durante il primo pomeriggio.
La zona è risultata ricca di traffico pedonale e ciclabile grazie alla dotazione di servizi in ottimo stato per la mobilità dolce. Più rara è invece la sosta poiché, non essendoci un polo attrattivo, l'area risulta solo di passaggio. Durante il sopralluogo è stata notata la presenza di una persona nell'area di progetto che riposava sul prato all'ombra della vegetazione.

Fortemente impattante sul comfort sonoro è la presenza della ferrovia a sud con un frequente passaggio di mezzi. I binari sono posizionati a un livello superiore rispetto all'area di progetto e sono nascosti da un'alberatura alta e fitta. Grazie alla vegetazione, se non vi è alcun transito di treni, non ci si accorge della presenza della ferrovia.

Dall'altro lato, a nord, a un livello inferiore, vi è invece l'elemento fluviale. Quest'ultimo non viene percepito poiché di piccole dimensioni e retrostante ad un filare di alberi e arbusti alti.

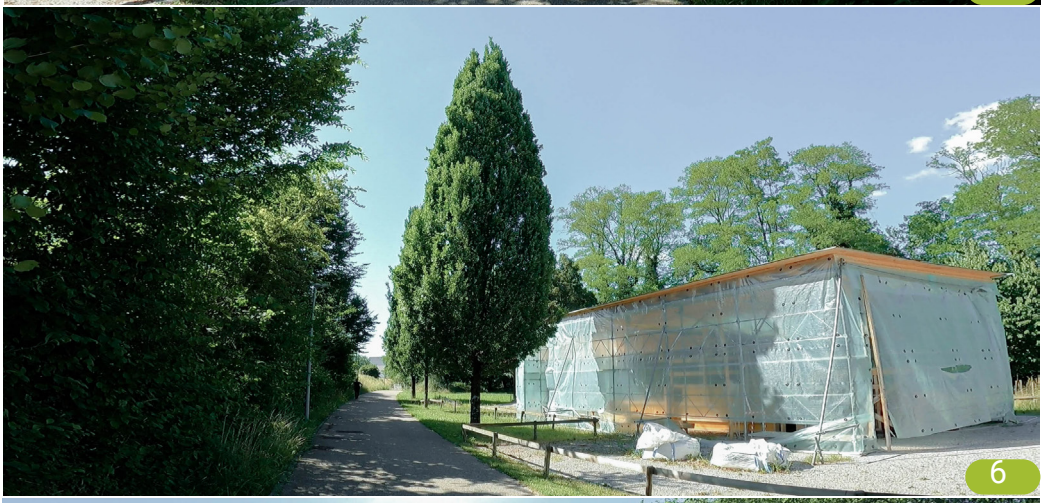
1

2

3

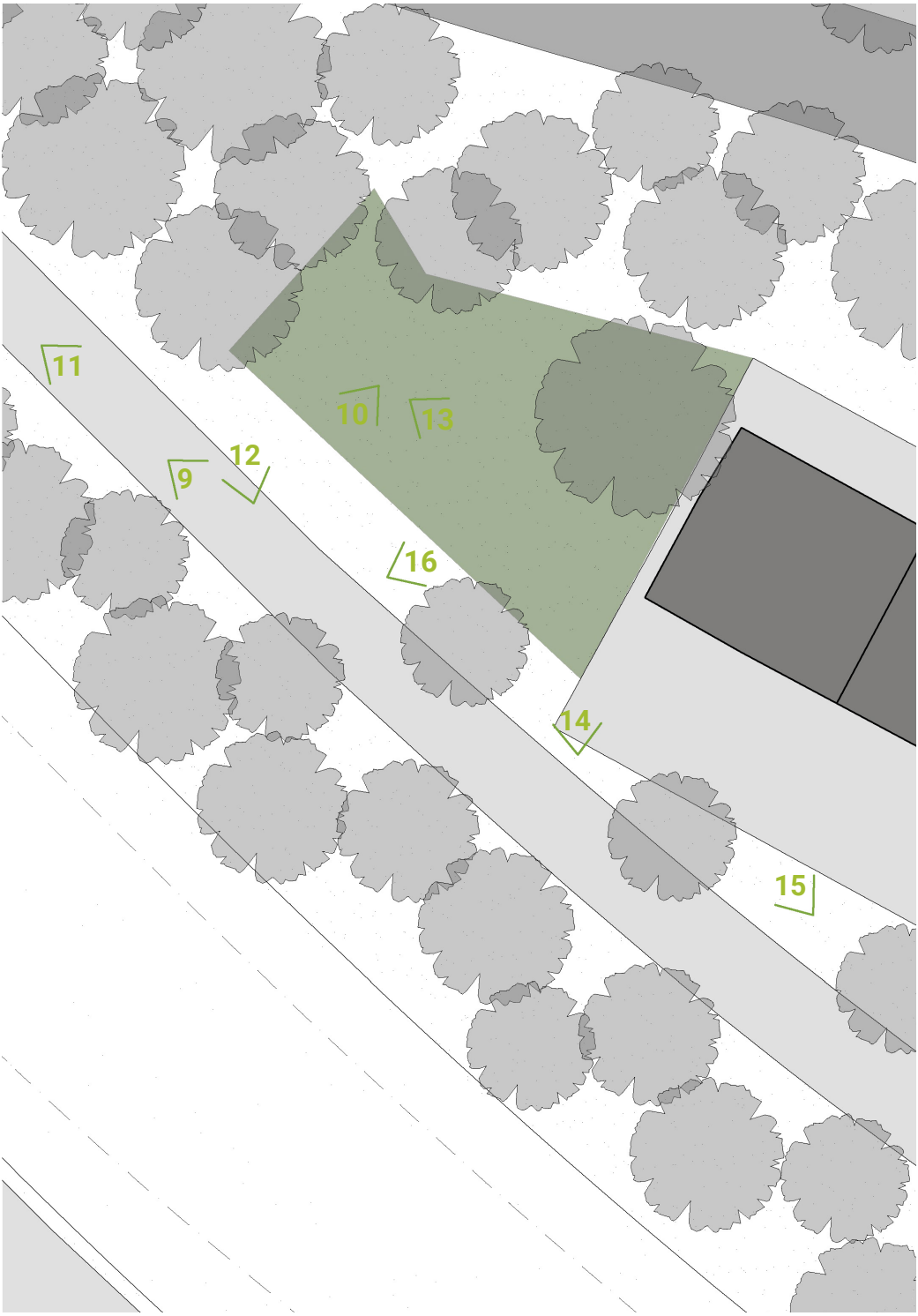
4

5


6

7

8


11
10
13
12
9
16
14
15

Gli elementi antropici

Anche se l'area progettuale è situata in una zona prettamente industriale e nei pressi della ferrovia, l'elemento dominante è il verde.

Durante il sopralluogo, seppur questo sia stato effettuato in orario diurno, è stata rilevata un elevata quantità di pali per l'illuminazione pubblica quindi si suppone che la ciclabile sia utilizzata anche in orario serale.

L'accesso al sito è possibile solamente a piedi o in bicicletta, ma essendoci un ampio parcheggio a circa 150 metri dall'area è anche molto comodo da raggiungere con un mezzo proprio. Il parcheggio è dotato anche di una tettoia per parcheggiare all'ombra e di alcune colonnine di ricarica elettrica alimentate da pannelli fotovoltaici.

Figura 32: Navigatore fotografico dell'area di progetto.

Fonte: produzione propria sulla base del PRG comunale.

9

10

11

12

13

14

15

16

1.3 Il progetto

1.3.1 Le destinazioni d'uso

La tipologia degli ambienti inseribili all'interno della *Circular Tower* sono stati indicati nel bando di concorso, con specifiche in merito alle dimensioni e alle funzioni che gli spazi dovrebbero ospitare.

Gli ambienti che possono essere inseriti nella torre sono i seguenti:

- Sale eventi per effettuare conferenze sui temi dell'economia circolare o della sostenibilità;
- Laboratori per effettuare ricerche in merito alla densità abitativa, alle applicazioni della domotica, alla produzione e all'accumulo di energia o alle facciate sostenibili;
- Sale mostre per presentare materiali e metodi di riciclaggio innovativi, sulle innovazioni nell'edilizia e sulla costruzione circolare;
- Spazi per ospitare le scolaresche al fine di promuovere la sostenibilità e diffondere la passione verso le discipline STEM (scienza, tecnologia, ingegneria, matematica);
- Unità abitative per studenti o moduli alberghieri;
- Piattaforma panoramica.

Il progetto *Circular Tower* risulterebbe maggiormente ottimizzato se al suo interno ospitasse destinazioni d'uso inerenti ai temi della sostenibilità, dividendo gli spazi disponibili nelle funzioni di ricerca, divulgazione e formazione.
Per mantenere un'omogeneità funzionale e per incentivare il pernottamento nelle strutture ricettive già presenti nella città, verrà esclusa la presenza delle unità abitative.
A seguito delle richieste descritte nel bando di concorso, le utenze che usufruiranno degli ambienti all'interno della *Circular Tower* saranno le seguenti: i ricercatori e il personale, gli ospiti, le scolaresche e i turisti-visitatori.
Di seguito è riportato un diagramma che definisce specificatamente gli ambienti che ogni utente potrà utilizzare.

La progettazione dei singoli ambienti è guidata dallo studio preliminare delle funzioni e dei requisiti di ogni singola tipologia al fine di ottenere un progetto consapevole in merito alle esigenze degli occupanti.

Lo studio degli ambienti è stato eseguito in primis osservando e analizzando le necessità illuminotecniche, acustiche e termiche, le quali concorrono al raggiungimento del comfort interno.

Successivamente sono state definite altre caratteristiche al contorno tra cui l'accessibilità, le specifiche finiture in merito al tipo di ambiente e gli arredi necessari all'utilizzo dello spazio in analisi.
Ogni ambiente è progettato per accogliere precise tipologie di utenze.

I laboratori di ricerca

Teclab necessita di ambienti dedicati alla ricerca, i laboratori che la ospitano sono predisposti all'interno di container *Hight Cube Standard*.
Esistono diverse tipologie di laboratori preallestiti, perciò è necessario poter sostituire i suddetti moduli secondo le necessità.
Gli utenti del suddetto ambiente saranno unicamente i ricercatori.
I laboratori necessitano di un sufficiente isolamento acustico ed una corretta quantità di apparecchi illuminanti concentrati sulle postazioni di lavoro per garantire ai lavoratori uno spazio silenzioso e adeguatamente illuminato.
L'illuminazione naturale sarà controllata dall'involucro in modo tale che la luce non risulti diretta.
L'assenza di barriere architettoniche garantirà una completa accessibilità.

Le sale eventi

La sala eventi sarà predisposta per molteplici utilizzi tra cui lo svolgimento di conferenze, tavole rotonde, presentazioni e attività scolastiche. L'utenza che usufruirà della sala comprenderà le scolaresche e gli ospiti invitati agli eventi.
L'isolamento acustico deve garantire l'insonorizzazione per un corretto svolgimento delle attività.
L'involucro offrirà la possibilità di ricevere luce naturale non diretta, corredata dalla presenza di apparecchi luminosi per svolgere le attività anche in orario serale.
L'ambiente risulterà riscaldato mediante un sistema di riscaldamento sfruttando gli impianti alimentati tramite energia rinnovabile.
Gli arredi essenziali che permetteranno un completo utilizzo dello spazio saranno: uno stage, lavagne *lim*, proiettori, sedute removibili e tavoli per gli ospiti.
Sarà predisposto uno spazio per lo stoccaggio degli arredi rendendo così l'ambiente versatile nel suo utilizzo.
Anche in questo caso, l'assenza di barriere architettoniche garantirà una completa accessibilità al pubblico.

Legenda

Ambiente silenzioso

Ambiente riscaldato

Luce naturale filtrata

Luce naturale

La terrazza panoramica

La terrazza panoramica rappresenta uno spazio *outdoor* con vista per sostare e rilassarsi osservando la città di Burgdorf.
La terrazza è aperta a ogni tipo di utenza e possederà una completa accessibilità.
Gli apparecchi luminosi permetteranno l'utilizzo sicuro di questo ambiente anche in orario serale.
Gli arredi, tra cui sedute e parapetti, e le finiture dovranno essere adatti all'utilizzo da esterno per resistere agli agenti atmosferici.

La sala mostre

Spazio adibito all'esposizione di opere e prodotti finalizzati alla sensibilizzazione verso i temi della sostenibilità, per presentare materiali e metodi di riciclaggio innovativi ed infine per mostrare le novità nell'ambito dell'edilizia e della costruzione circolare.
La sala mostra sarà aperta al pubblico e completamente accessibile grazie all'assenza di barriere architettoniche. La luce naturale che entra attraverso l'involucro nell'ambiente non dovrà essere diretta sulle opere, le quali saranno ulteriormente illuminate da apparecchi luminosi puntuali. Gli arredi necessari all'uso dello spazio saranno pannelli e piedistalli movibili che permetteranno l'esposizione delle opere.

La hall

La hall ha la funzione di accoglienza, ricezione e informazione.
Rappresenta l'ambiente di snodo nevralgico nella struttura poiché connesso a tutte le altre funzioni.
La sala si presenterà priva di barriere architettoniche e si collocherà presumibilmente al piano terreno, quindi completamente accessibile al pubblico.
La luce naturale potrà giungere all'interno dell'ambiente mediante l'ampio involucro trasparente ed essere così ben visibile dalla pista ciclabile antistante all'area di progetto. Inoltre l'illuminazione artificiale ne permetterà l'uso serale.
La hall non necessiterà di particolare isolamento acustico.
Gli arredi necessari per l'utilizzo della hall saranno: un banco per definire l'area di accredito e reception, dei totem informativi e alcune sedute per l'attesa.

Legenda

Ambiente silenzioso

Ambiente riscaldato

Luce naturale filtrata

Luce naturale

I servizi igienici

I servizi igenici che servono la struttura sono accessibili al pubblico e non presentano barriere architettoniche. I servizi non richiedono illuminazione naturale ma è necessario che sia presente un isolamento acustico adeguato e un sistema di riscaldamento.

Il locale tecnico

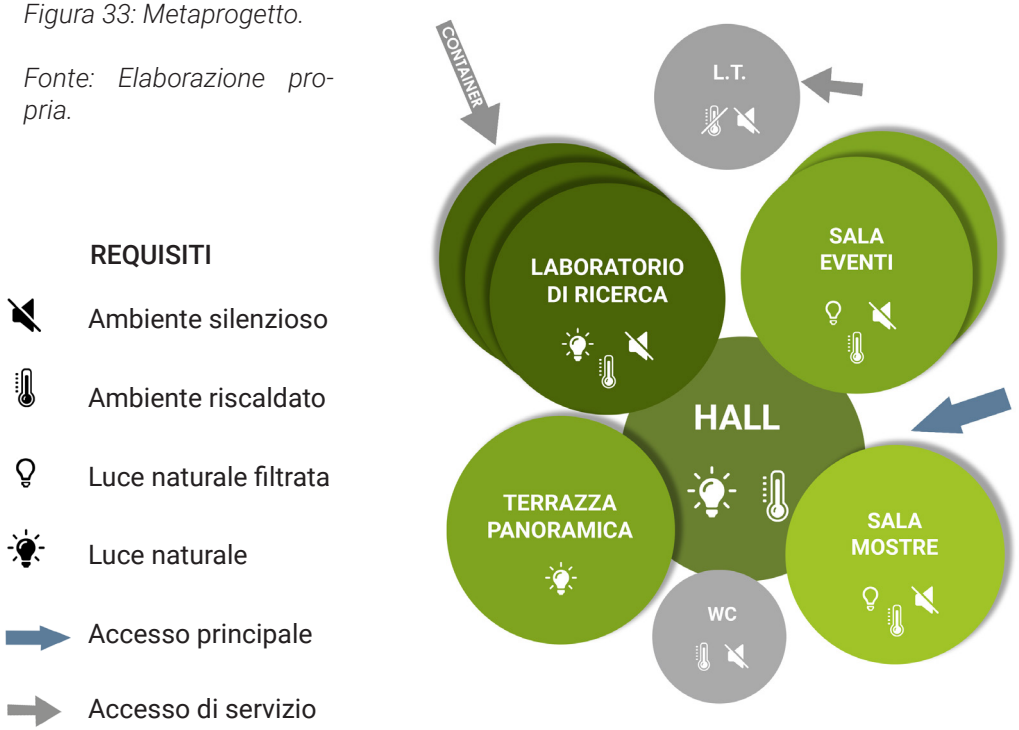
Il locale tecnico ospiterà tutte le componenti impiantistiche necessarie all'impianto elettrico e termico. L'ambiente non necessita di riscaldamento e illuminazione naturale mentre dovrà essere ben isolato acusticamente per evitare il disturbo dello svolgimento delle altre attività presenti nella torre. L'accesso a questo ambiente sarà diretto dall'esterno.

1.3.2 Il metaprogetto

Il metaprogetto mostra come le funzioni non interagiscano direttamente tra loro ma siano tutte connesse alla hall che distribuisce e collega ogni ambiente.
La hall inoltre presenta l'ingresso principale alla struttura in modo tale che il passaggio avvenga dal punto di accredito per controllare e indirizzare gli utenti.
Si può osservare l'indipendenza del locale tecnico isolato dalle altre funzioni con un proprio accesso.

Figura 33: Metaprogetto.

Fonte: Elaborazione propria.



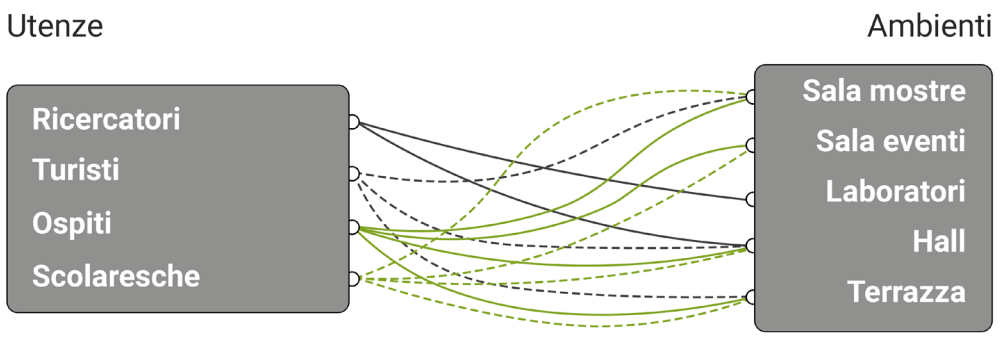
1.3.3 Definizione delle utenze

Sono state identificate quattro tipologie di utenze per la *Circular Tower*. I ricercatori svolgeranno le loro attività di ricerca all'interno dei moduli preallistiti. I turisti potranno visitare la sala mostre e la terrazza, mentre gli ospiti delle convention occuperanno la sala eventi.
Quest'ultime, data la loro versatilità, potranno essere usate anche dalle scolaresche, poiché Teclab prevede attività congiunte con le scuole.

Nella figura 34 sono rappresentati graficamente i rapporti tra le utenze e gli ambienti, che influenzano i processi progettuali di definizione degli spazi.

Figura 34: Le utenze e gli ambienti dedicati.

Fonte: Elaborazione propria.

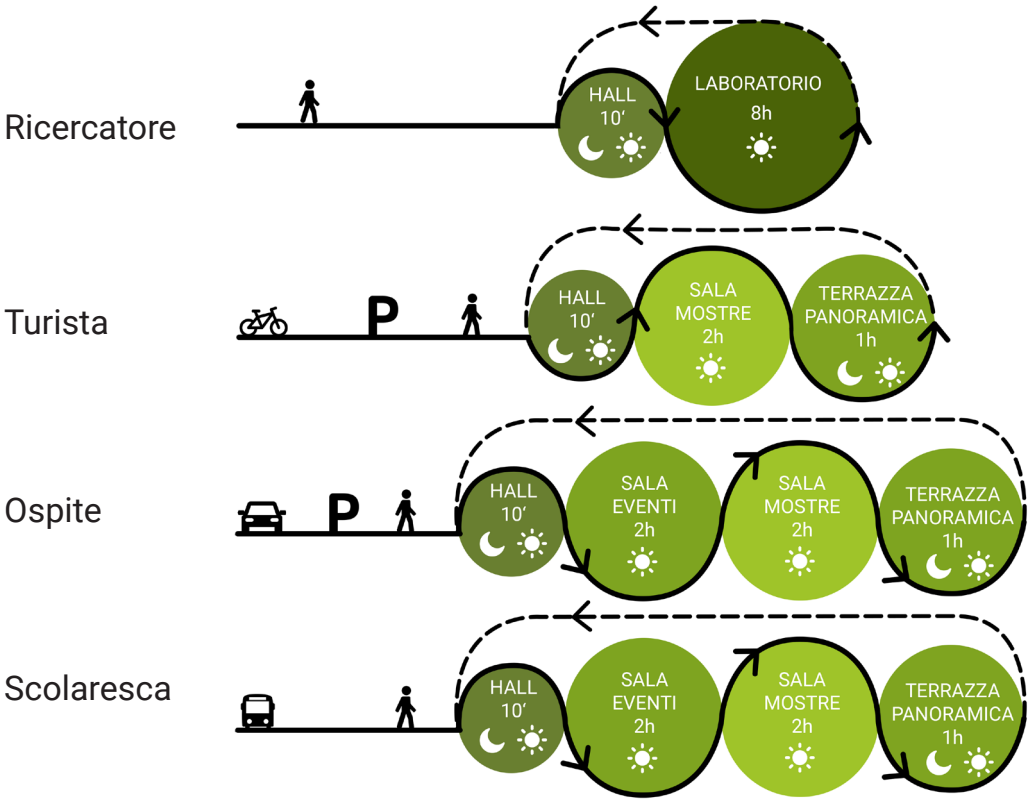


La relazione tra le utenze e gli ambienti

Figura 35: Tipologia di utilizzo degli ambienti da parte degli ospiti.

Fonte: Elaborazione propria.

Lo schema seguente, integrato al metaprogetto, permette di leggere con maggior chiarezza l'utilizzo degli spazi effettuato dalle specifiche utenze, aggiungendo il dato temporale di utilizzo nell'arco della giornata, dividendola in diurno e serale.



1.3.4 Concept progettuale

Nelle pagine seguenti verrà descritto il processo di sviluppo dell'idea progettuale diviso in quattro fasi, denominate: *Volumes*, *Functions*, *Energy*, *Accessibilty*.

Volumes

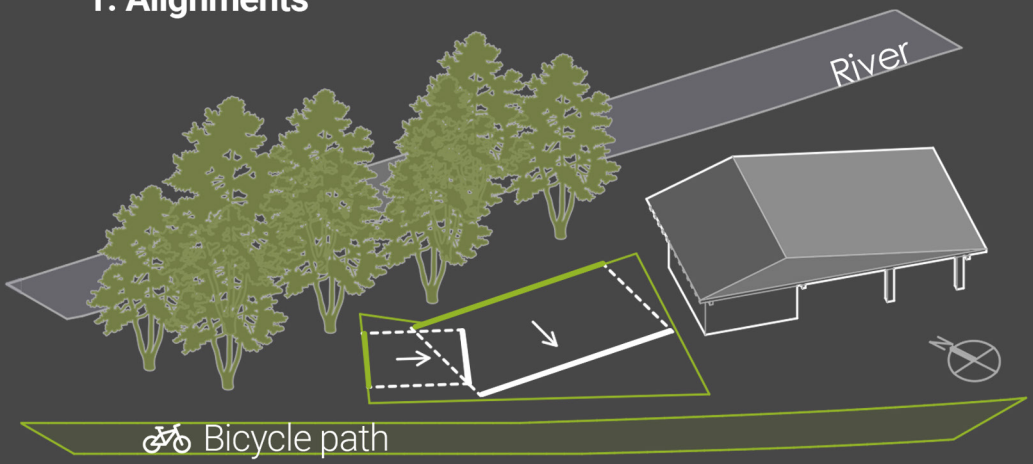
L'approccio alla definizione dei volumi è nato dallo studio della forma planimetrica irregolare del sito. Il contesto stesso suggerisce come fronte principale dell'edificio il lato Sud, in affaccio sulla pista ciclabile, poiché il lato Nord è cinto da alta vegetazione e un percorso fluviale, mentre a Est vi è una preesistenza.
Sono stati mantenuti due allineamenti di base, creando degli *offset* del perimetro dell'area. In questo modo si è creato uno spazio filtro antistante il fronte principale, invogliando il rallentamento e la sosta dei passanti. Inoltre, la scelta di mantenere come allineamento principale il lato Nord del perimetro è dettata dalla volontà di orientare il volume verso Sud-Ovest, dove è collocato il parcheggio carrabile preesistente.
Il risultato degli allineamenti è il disegno di due forme quadrilatere, intersecate tra loro, le quali verranno estruse creando un volume principale, più esposto e visibile, e un vano di servizio di dimensioni ridotte, posto a Nord-Ovest.

Figura 36: Concept-volumes.

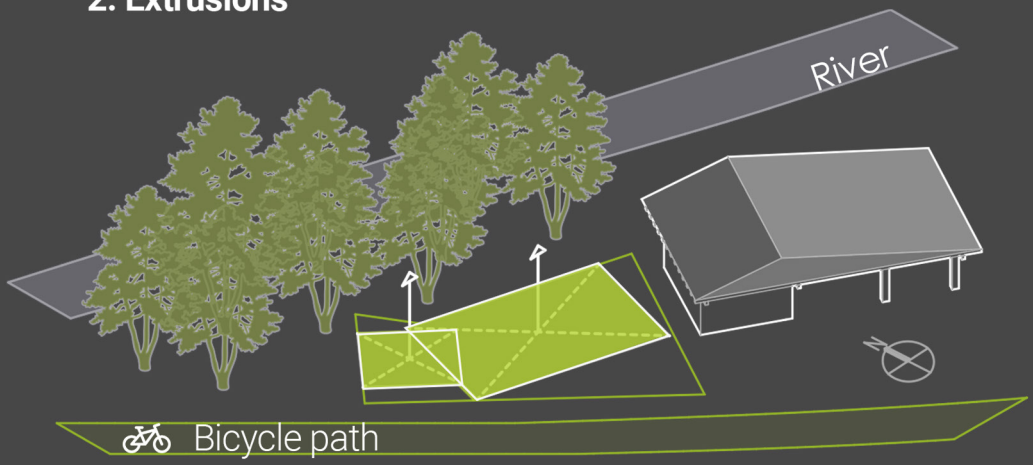
Fonte: Elaborazione propria.

VOLUMES

1. Alignments



2. Extrusions



Functions

Definiti i volumi, sono state delineate le funzioni d'uso principali di ogni piano.
I vincoli dettati dal bando di concorso riguardano: l'altezza totale dell'edificio massima di 30 m e le altezze interpiano minime nette di 3 m.
Sono state quindi ipotizzate le altezze interpiano lorde da cui si è potuto ottenere il numero finale di piani.
I sette piani sono così distribuiti: al piano terra è collocata la hall e in vista della progettazione di un sistema elevatore che permette l'intercambiabilità dei moduli direttamente dall'interno del piano terra, i tre piani seguenti ospitano i laboratori di ricerca. Seguono una sala mostre e due piani adibiti agli eventi che godono di una visuale migliore. Al culmine della torre è presente una terrazza panoramica accessibile al pubblico.

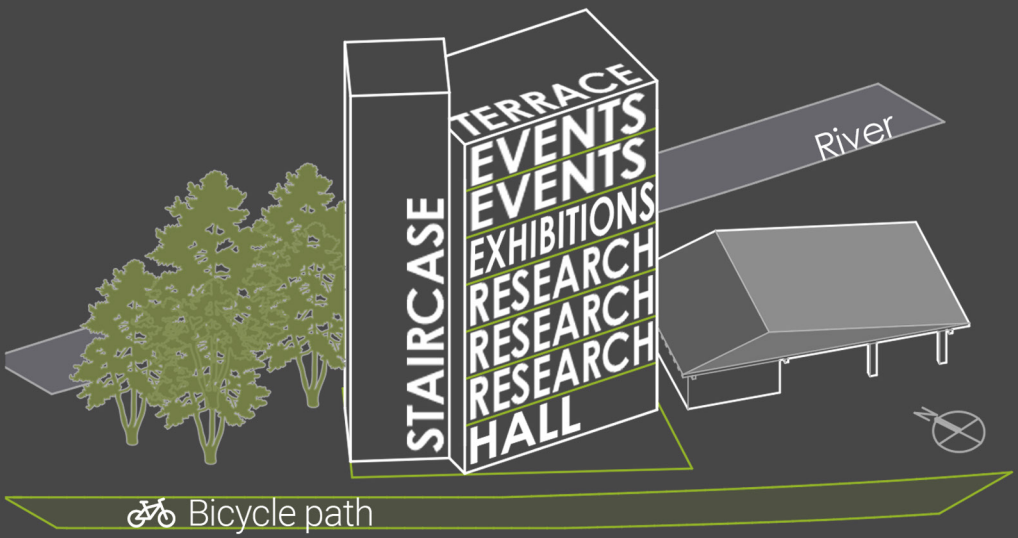
Le aperture sono state progettate in seguito alla definizione delle funzioni di ogni piano, rispettando i requisiti descritti precedentemente nel metaprogetto. Il volume maggiore presenta superfici vetrate più ampie rispetto a quello secondario poiché accoglie il vano scala.

Figura 37:
Concept-functions.

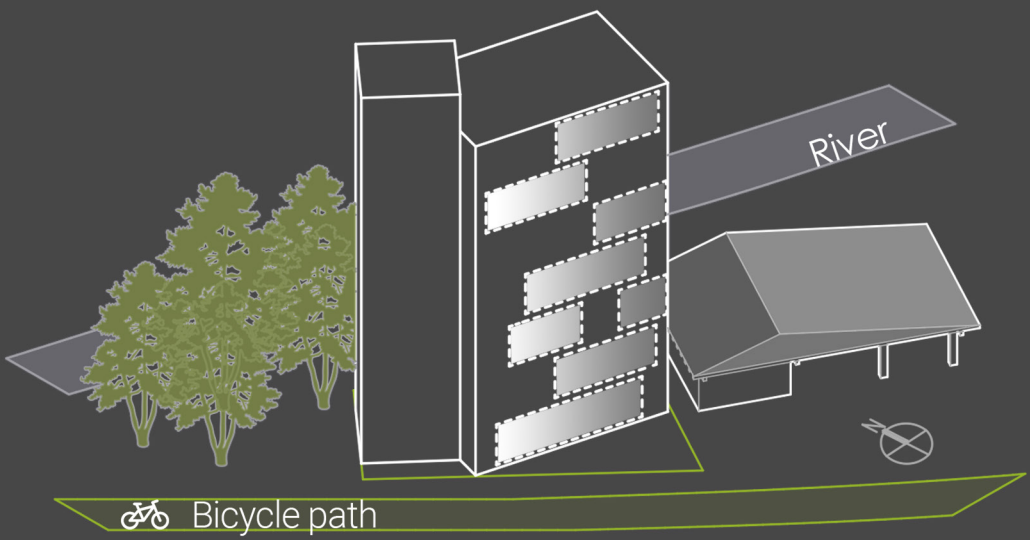
Fonte:
Elaborazione propria.

FUNCTIONS

3. Floors



4. Daylight



Energy

Le aperture descritte nella fase precedente diventano la sede in cui collocare dei volumi vetrati, che avranno le funzioni di serre solari. Queste apporteranno benefici all'edificio in termini di comfort termico e luminoso.
Inoltre la superficie vetrata di queste serre sarà realizzata mediante pannelli fotovoltaici trasparenti a bassa densità con celle monocrostalline, le quali permetteranno alla serra di svolgere le sue funzioni di elemento bioclimatico e di produrre energia pulita allo stesso tempo.

Anche il vano scala verrà rivestito da pannelli fotovoltaici opachi, integrati con l'involucro, poiché è emerso dagli studi preliminari che i pannelli fotovoltaici delle sole serre solari non soddisfano i requisiti di autosufficienza.

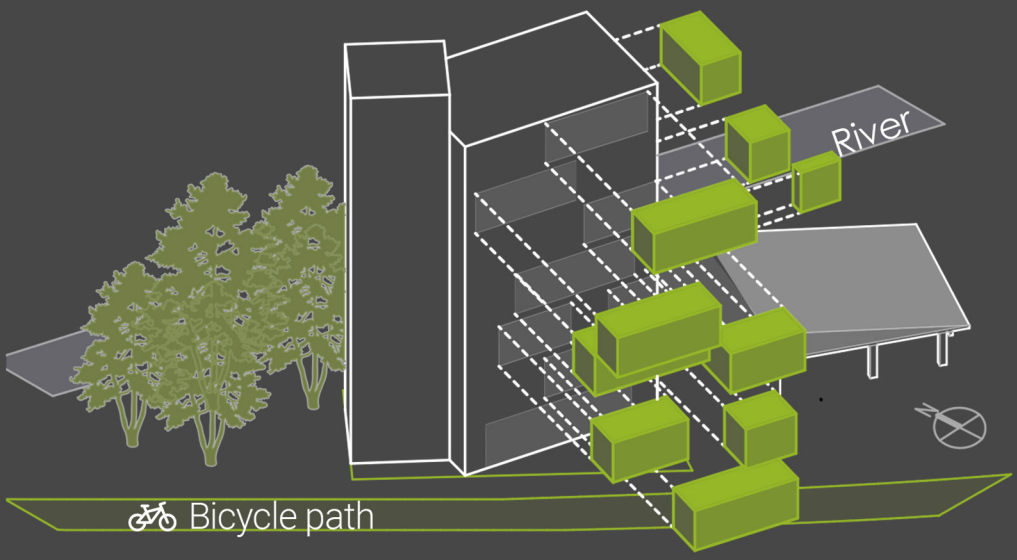
Al fine di massimizzare la produzione energetica delle serre fotovoltaiche, le loro superfici maggiori sono state rivolte a Sud effettuando una rotazione di 15°.

Figura 38:
Concept-energy.

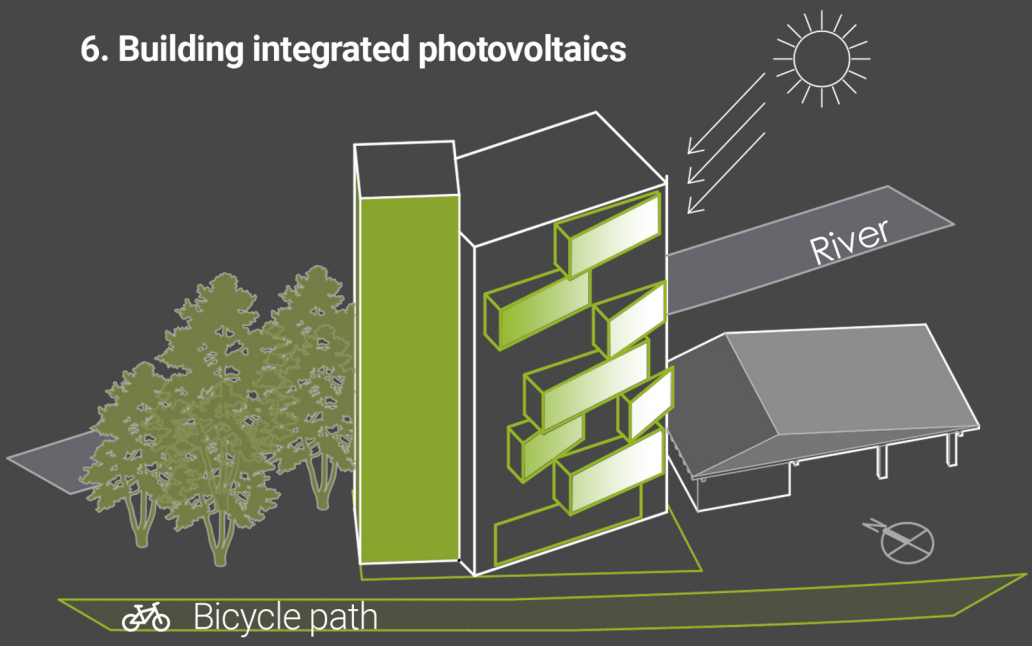
Fonte:
Elaborazione propria.

ENERGY

5. Greenhouses with glazed PV panels



6. Building integrated photovoltaics



Accessibility

Infine, sono stati studiati gli accessi alla torre.
La hall al piano terra offre due accessi. Il primo per gli ospiti e i visitatori e il secondo, usato meno frequentemente, per i container.
Le normative antincendio descrivono la necessità di progettare un'apertura sull'esterno, utilizzabile solo in caso di emergenza, per indirizzare gli utenti verso la via d'esodo, sfollando velocemente l'edificio. Quest'apertura è posta al termine del vano scala, affacciandosi senza ostacoli sulla pista ciclabile.

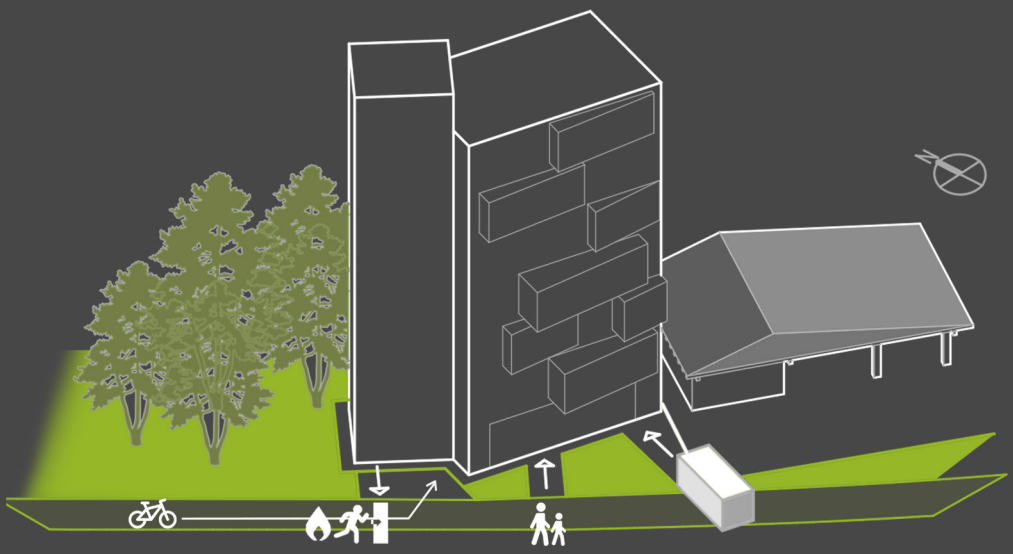
Lo schema *Distribution* mostra l'ingresso dei pedoni connesso al loro indirizzamento verso il vano scala per raggiungere il piano desiderato. Anche i container preallestiti che effettuano un ingresso dal piano terra si elevano poi nei piani superiori mediante un meccanismo spiegato nel paragrafo successivo.

Figura 39:
Concept-accessibility.

Fonte:
Elaborazione propria.

ACCESSIBILITY

7. Accesses



8. Distribution

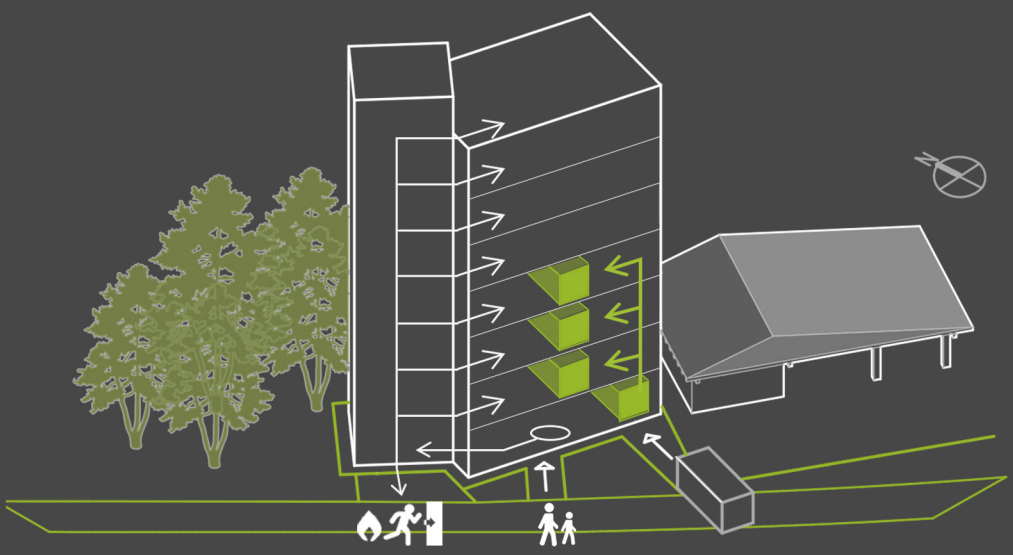


Figura 40:
Vista esterna della Circualr Tower.

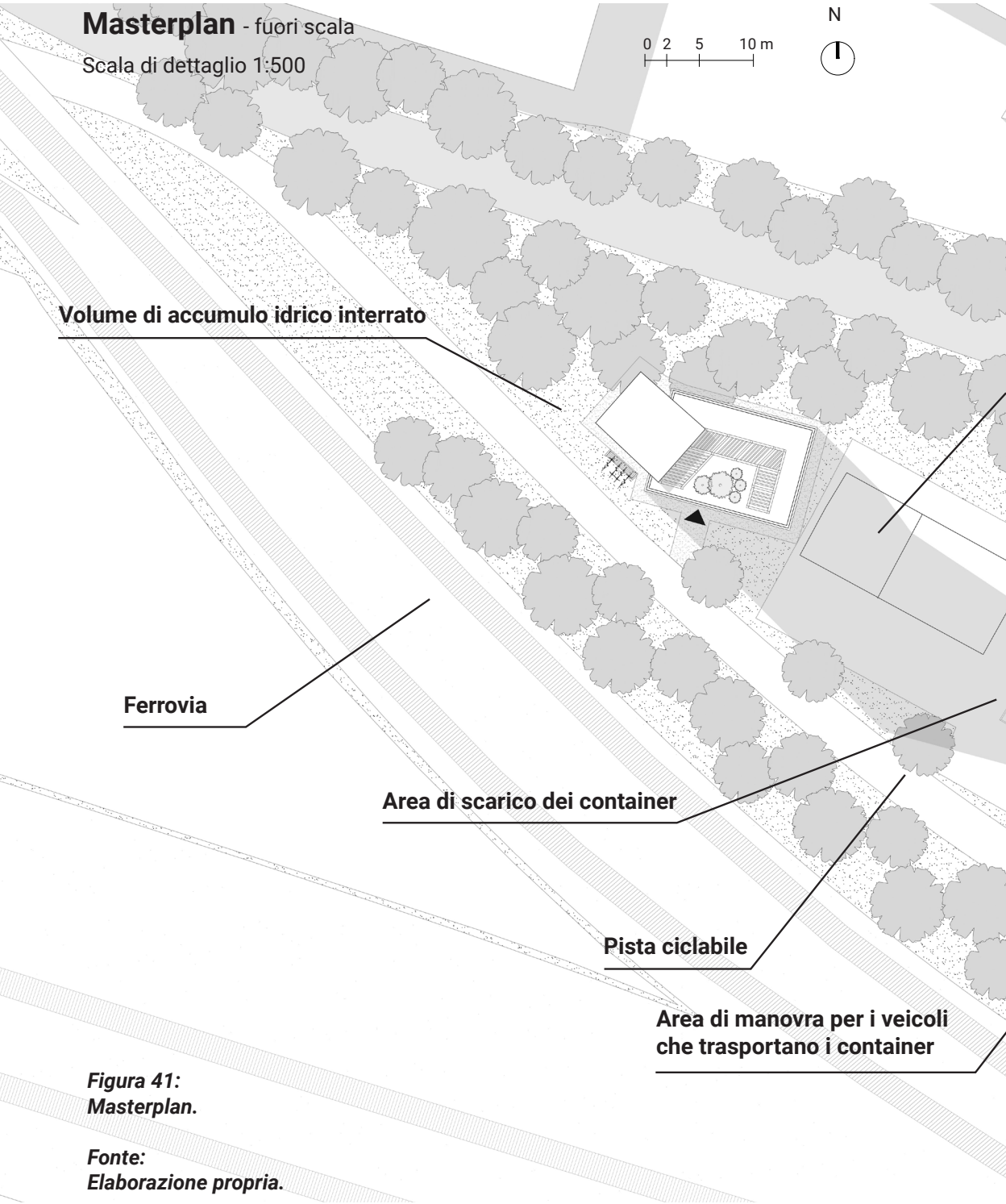
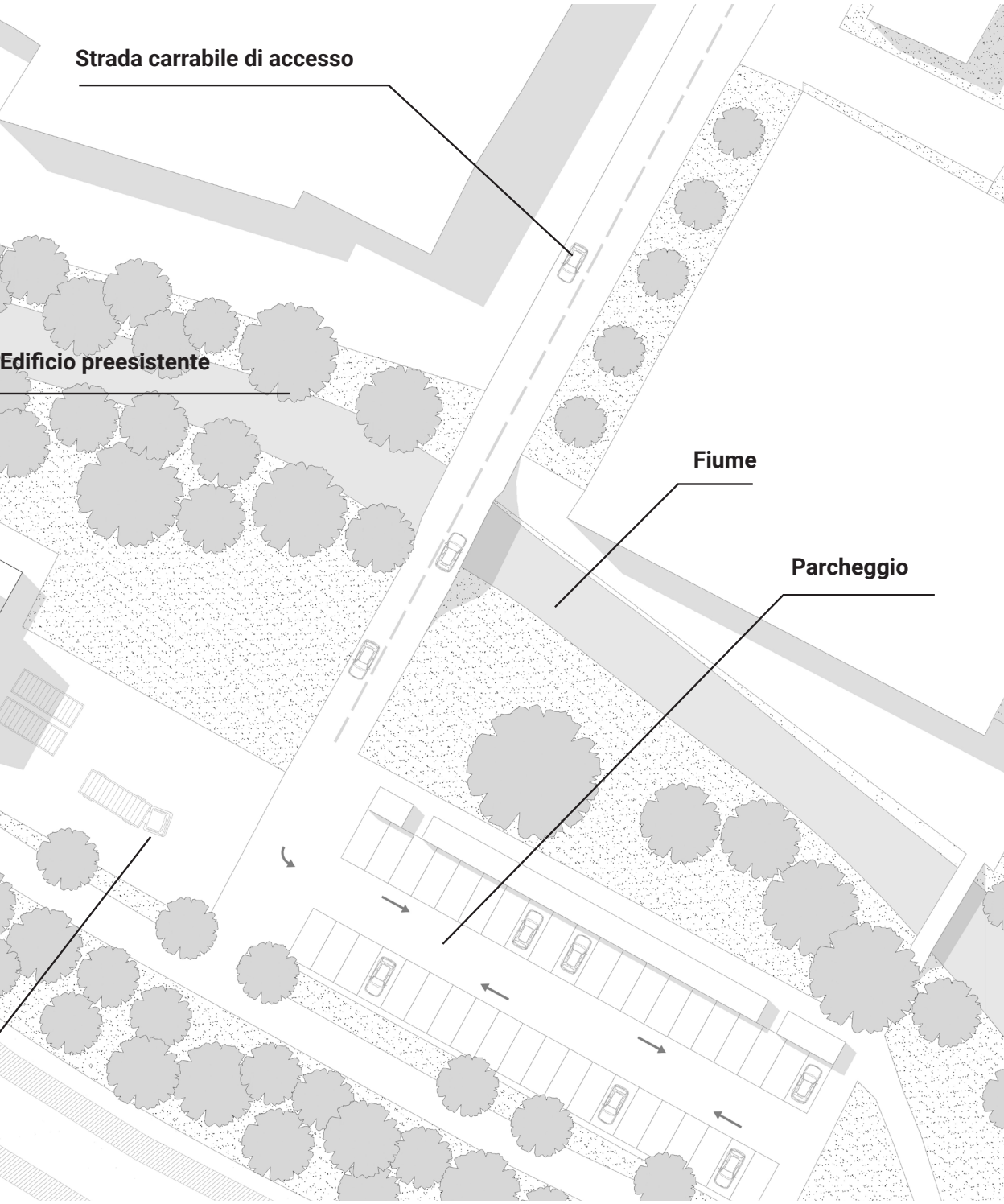


Figura 41:
Masterplan.

Fonte:
Elaborazione propria.


Strada carrabile di accesso
Edificio preesistente
Fiume
Parcheggio

1.3.5 Elaborati in scala 1:200

In questo paragrafo vengono riportati gli elaborati in scala 1:200 presentati al concorso tra cui le planimetrie di ogni piano, due sezioni e i prospetti di ogni fronte.

Figura 42:
Planimetria del piano terra, scala 1:200.

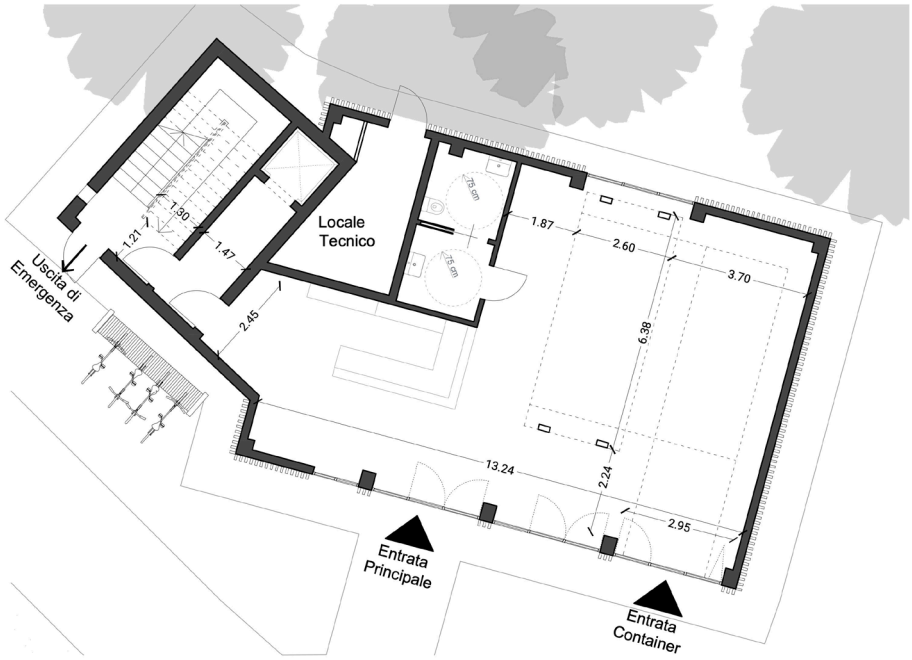
Fonte:
Elaborazione propria.

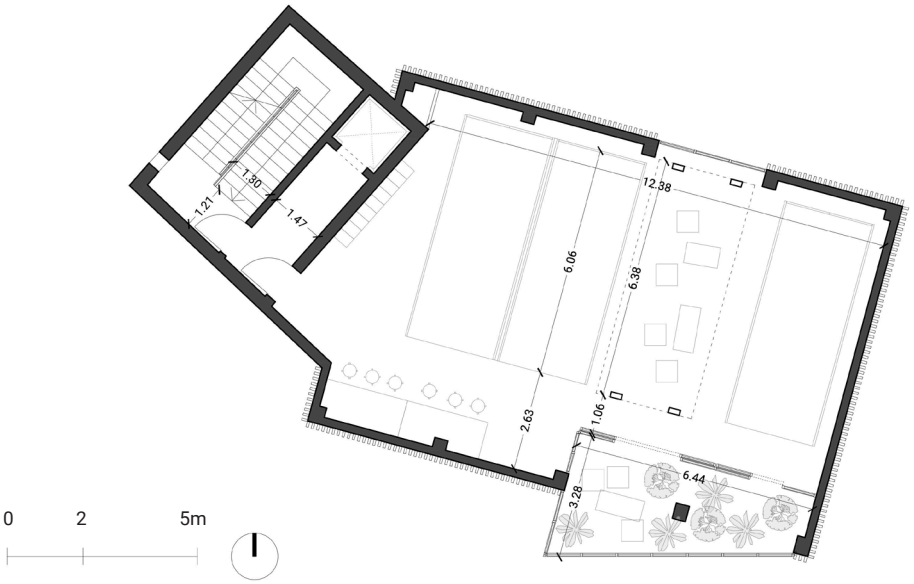
Piano terra

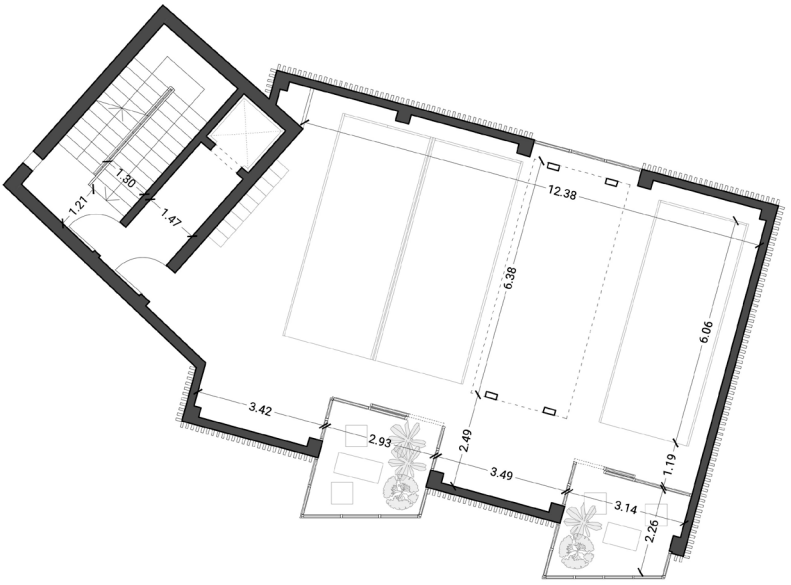
All'esterno è presente una postazione per il deposito delle biciclette limitrofa all'ingresso. L'edificio è perimetrato da un marciapiede utile anche per allontanare l'acqua piovana dalle fondamenta, evitando marcescenze e infiltrazioni.
L'accesso alla porta principale è definito da un percorso pavimentato, permeabile, orientato sull'asse Sud-Est accogliendo gli ospiti che giungono dal parcheggio carrabile, ipotizzando che questo sia il flusso maggiore di arrivo.
Il piano è posto alla quota di terra, non presentando dislivelli in ingresso e favorendo l'accessibilità. Lo spazio retrostante alla porta di ingresso è occupato dalla reception, in posizione centrale al piano, adiacente al vano scale.
Il piano terra ospita il sistema elevatore e lo spazio è progettato con arredi leggeri, in modo che, nei periodi di inutilizzo, possa essere sfruttato come area *relax* e di coesione sociale.
Infine, sono presenti un servizio igienico accessibile ai disabili e un locale tecnico con un unico accesso dall'esterno.

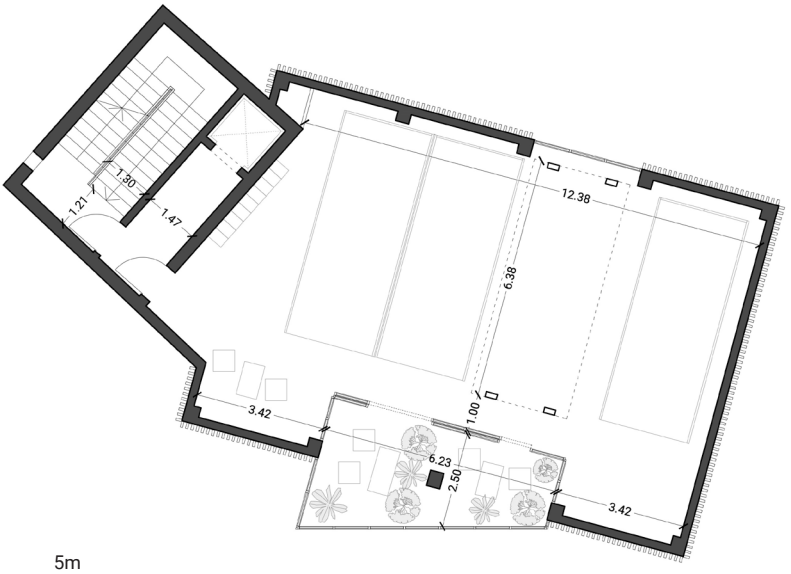
Figura 43: Planimetria del primo piano, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.


Locale
Tecnico
Uscita di
Emergenza
Entrata
Principale
Entrata
Container
1.50
1.21
1.47
2.45
75 cm
75 cm
1.87
2.60
3.70
6.38
13.24
2.24
2.95


1.30
1.21
1.47
12.38
6.06
6.38
2.63
1.06
6.44
3.28
0
2
5m


1.21
1.30
1.47
12.38
6.38
6.06
3.42
2.93
2.49
3.49
1.19
3.14
2.26


1.21
1.30
1.47
12.38
6.38
3.42
1.00
6.23
2.50
3.42

0 2 5m

Piano primo, secondo e terzo

Figura 44:
Planimetria del secondo piano, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

Questi piani ospitano i container preallestiti con la funzione di ricerca. L'accesso degli utenti avviene mediante il vano scala e l'ascensore, mentre quello dei container attraverso il sistema elevatore connesso al piano terra.
Il vano nel solaio, che permette l'accesso dei laboratori movibili, viene temporaneamente ostruito da un sistema di pannelli scorrevoli che permettono lo sfruttamento del suddetto spazio come area relax o spazio di lavoro collettivo.
Sono predisposti alcuni armadietti per i ricercatori nell'area limitrofa all'ingresso sul piano.
La *Circular Tower* presenta dal primo piano in poi le serre biocliamtiche, affacciate sulla collina di Burgdorf. Queste offrono ambienti verdi, rilassanti per le pause lavorative, permettendo l'illuminazione del piano e offrendo luce naturale anche all'interno dei container.
Oltre ad illuminare meglio l'ambiente centrale, la presenza di una finestra sul lato Nord consente la generazione di flussi convettivi di aria per il corretto funzionamento del sistema bioclimatico.
Per rendere accessibili i container, questi sono stati collocati a una quota inferiore del pavimento. Una volta posizionati verranno collegati al sistema MEP tramite un dispositivo *plug and play*.

Figura 45: Planimetria del terzo piano, scala 1:200.

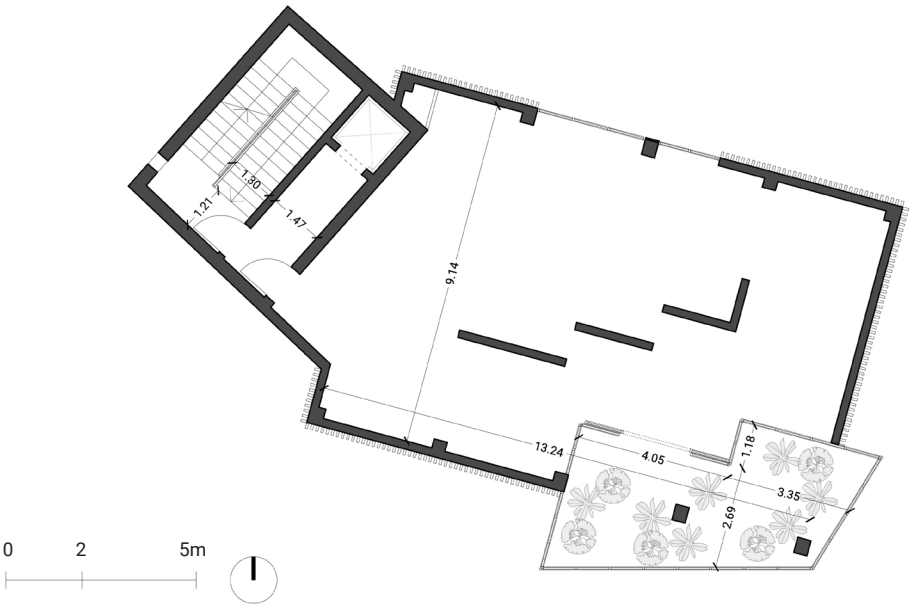
Fonte:
Elaborazione propria.

Quarto piano

La progettazione della struttura portante lignea a telaio ha permesso di creare un ampio spazio, senza ostacoli, per rendere massima la libertà espositiva.
Infatti, i setti riportati nella planimetria, che supporteranno le opere delle mostre, sono progettati come removibili per aderire alle esigenze mutevoli nel tempo.
In questo piano è presente una serra ad angolo che volge lo sguardo verso l'omonimo castello della città di Burgdorf.

Figura 46: Planimetria del quarto piano, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.



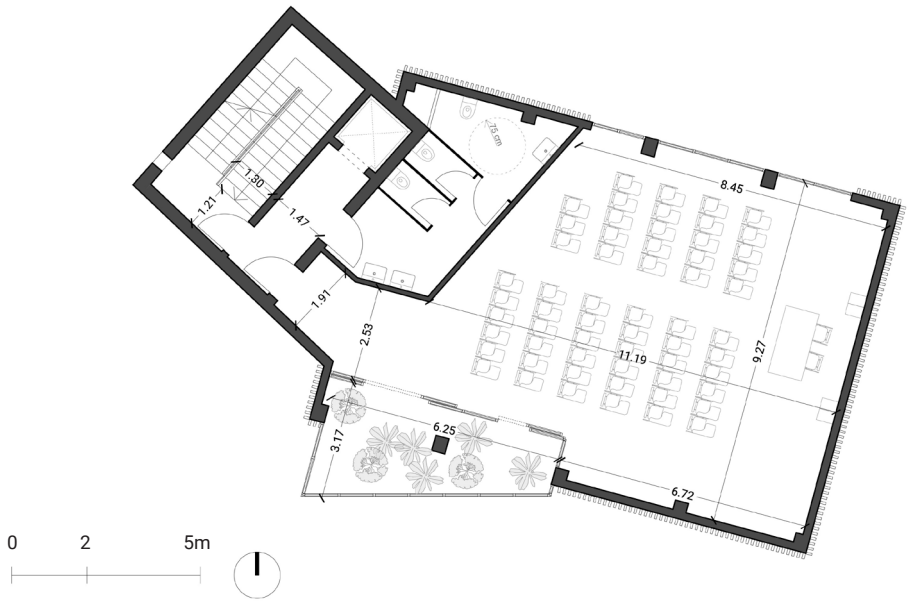
Quinto piano

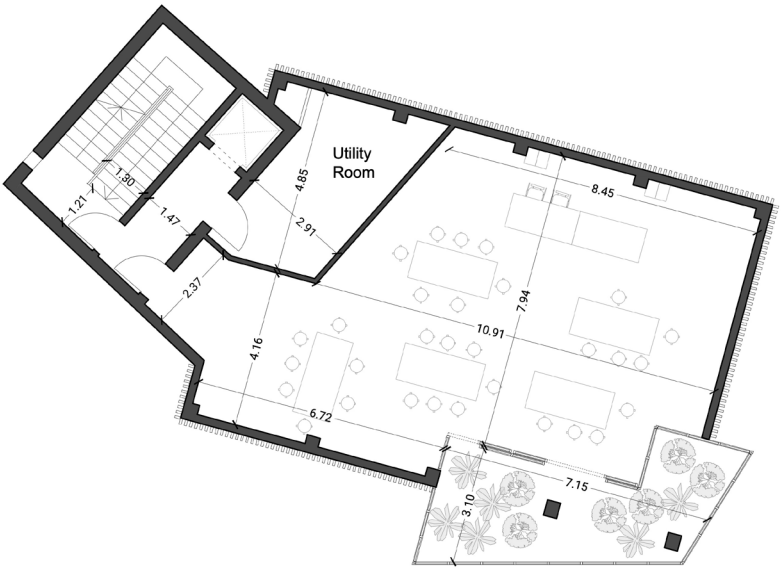
Figura 47: Planimetria del quinto piano, scala 1:200.

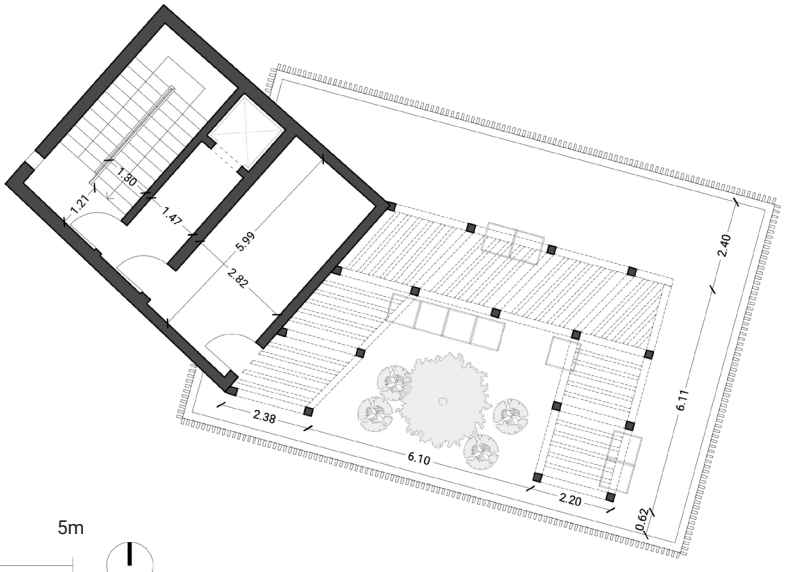
Fonte:
Elaborazione propria.

Al quinto piano, adibito alla funzione di sala eventi, sono presenti i servizi igienici utilizzabili per tutti gli utenti della torre. Per questo motivo, il loro accesso è stato progettato sul vano scala, rendendoli indipendenti dalla sala eventi. Per ottimizzare lo spazio e ridurre il consumo di acque sono state progettati tre *toilette* in un unico ambiente.

Il posizionamento delle sedute è organizzato per generare un passaggio centrale e due laterali di sicurezza. Gli arredi possono essere rimossi e stoccati al piano superiore per adattarsi alle esigenze mutevoli. La serra, su questo piano, è collocata a Sud-Ovest per illuminare l'ingresso ed evitare la luce diretta sulla parete dove avverranno le presentazioni.




Utility
Room
1.80
1.21
1.47
4.85
2.91
2.37
4.16
6.72
8.45
7.94
10.91
7.15
3.10


1.80
1.21
1.47
5.99
2.82
2.38
6.10
2.20
0.62
6.11
2.40

0 2 5m

Sesto piano

Figura 48: Planimetria del sesto piano, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

La sala eventi al sesto piano offre un ambiente di magazzino accessibile dal vano scala.
Questo piano è rivolto maggiormente agli eventi che includono tavole rotonde, *workshop*, *co-working*.
Come negli ambienti precedentemente descritti, è presente una serra, posizionata sull'angolo Sud-Est poiché la parete adibita alle presentazioni si collocherà a Nord.

Settimo piano

L'ultimo piano, scoperto, è adibito alla funzione di terrazza panoramica. È completamente praticabile, ombreggiato da una pensilina in legno, e il suo solaio è composto da un sistema *blue roof* capace di immagazzinare le acque piovane per poi stoccarle successivamente in un bacino di raccolta.

Figura 49: Planimetria del settimo piano, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

Figura 50: Prospetto Est, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

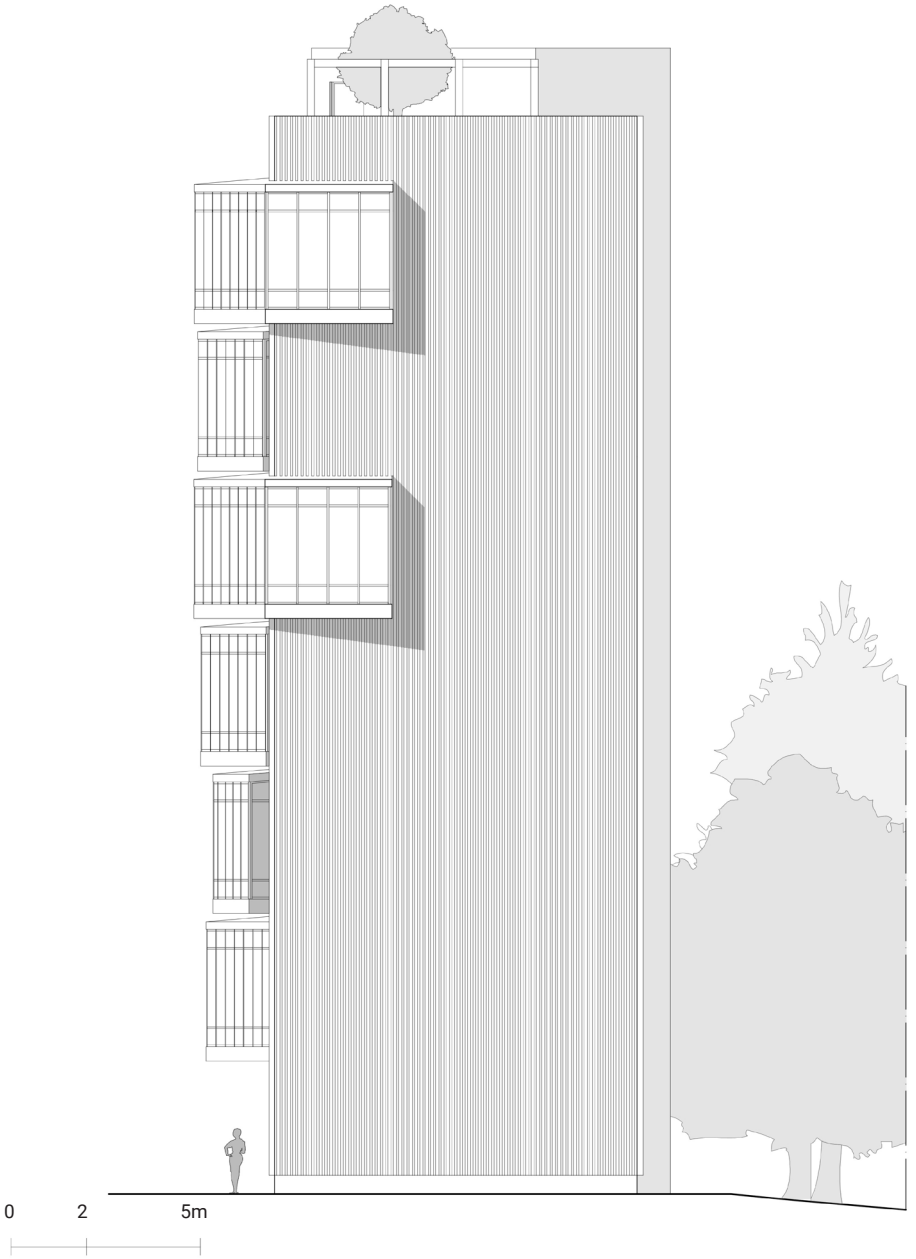


Figura 51: Prospetto Sud, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

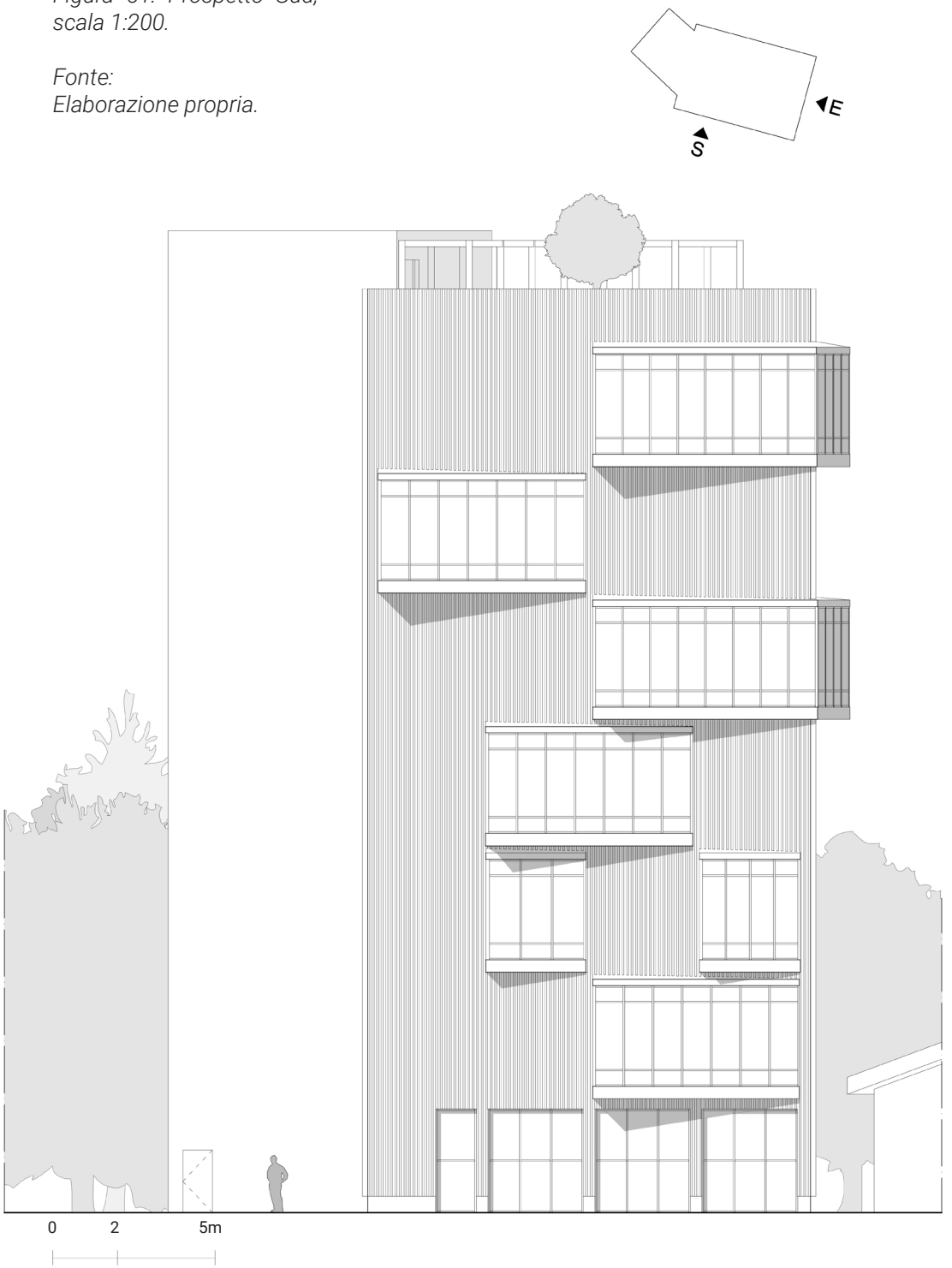


Figura 52: Prospetto Nord, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

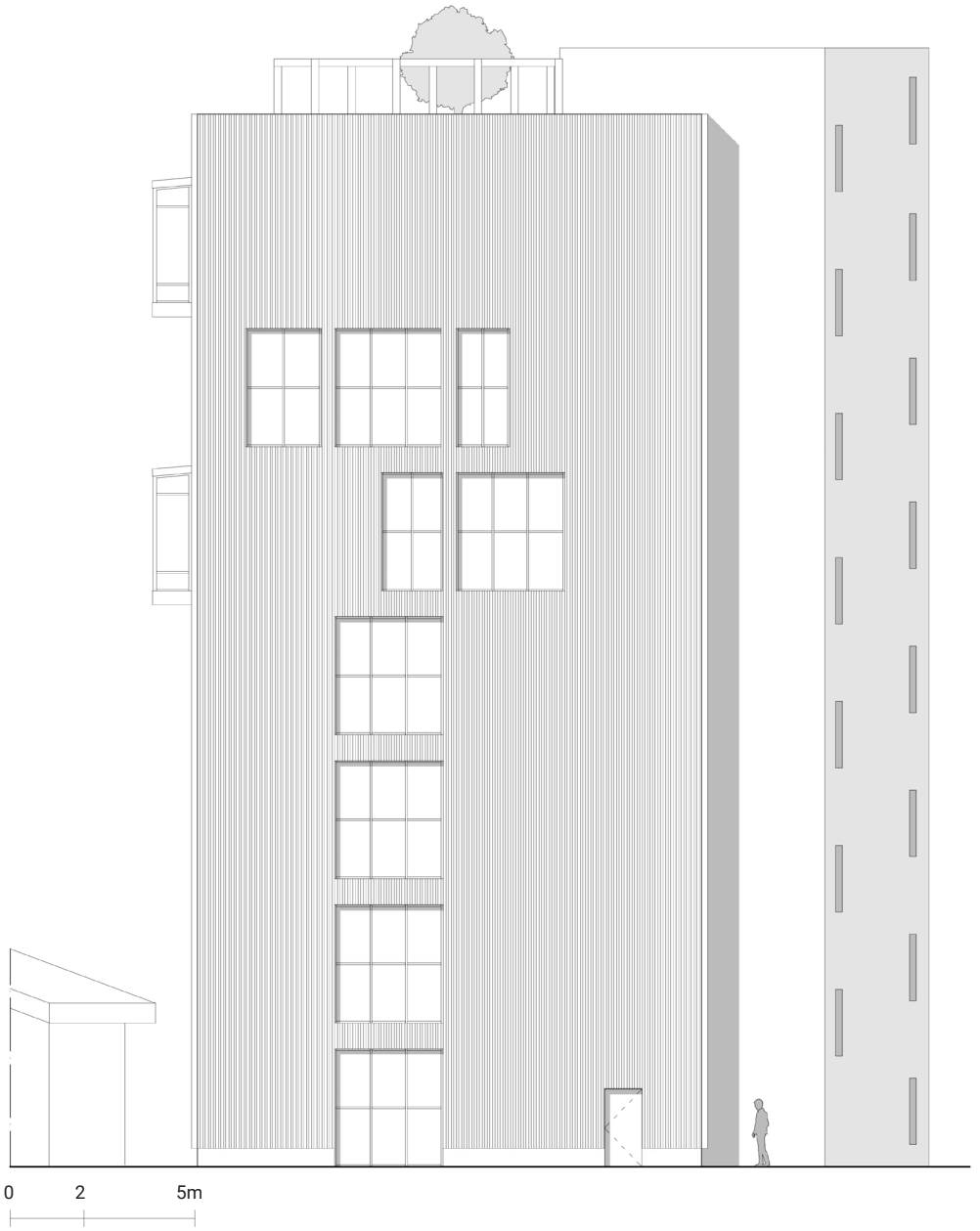
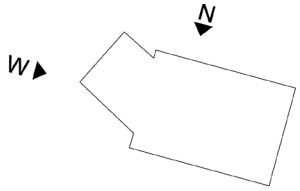


Figura 53: Prospetto Ovest, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.



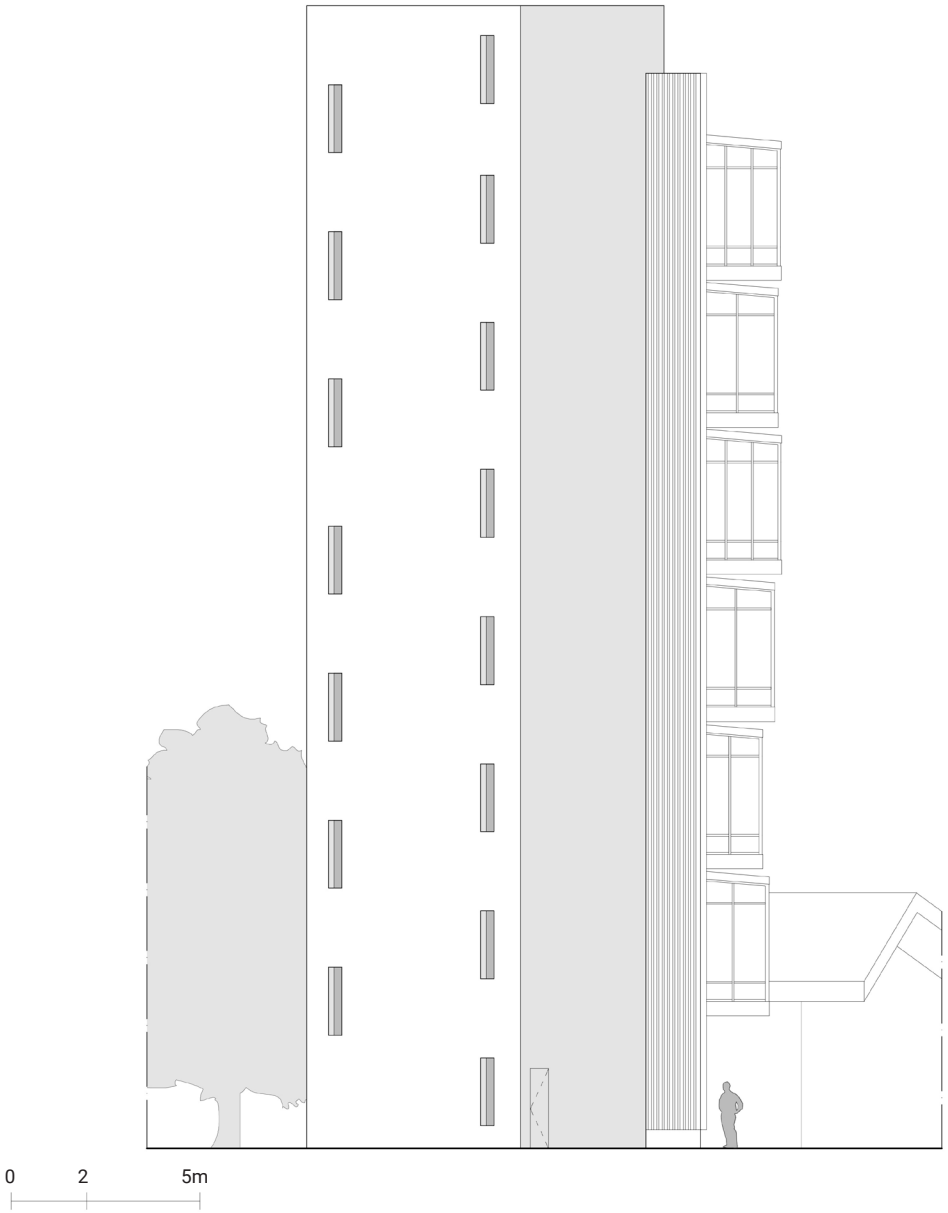


Figura 54: Sezione BB,
scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.

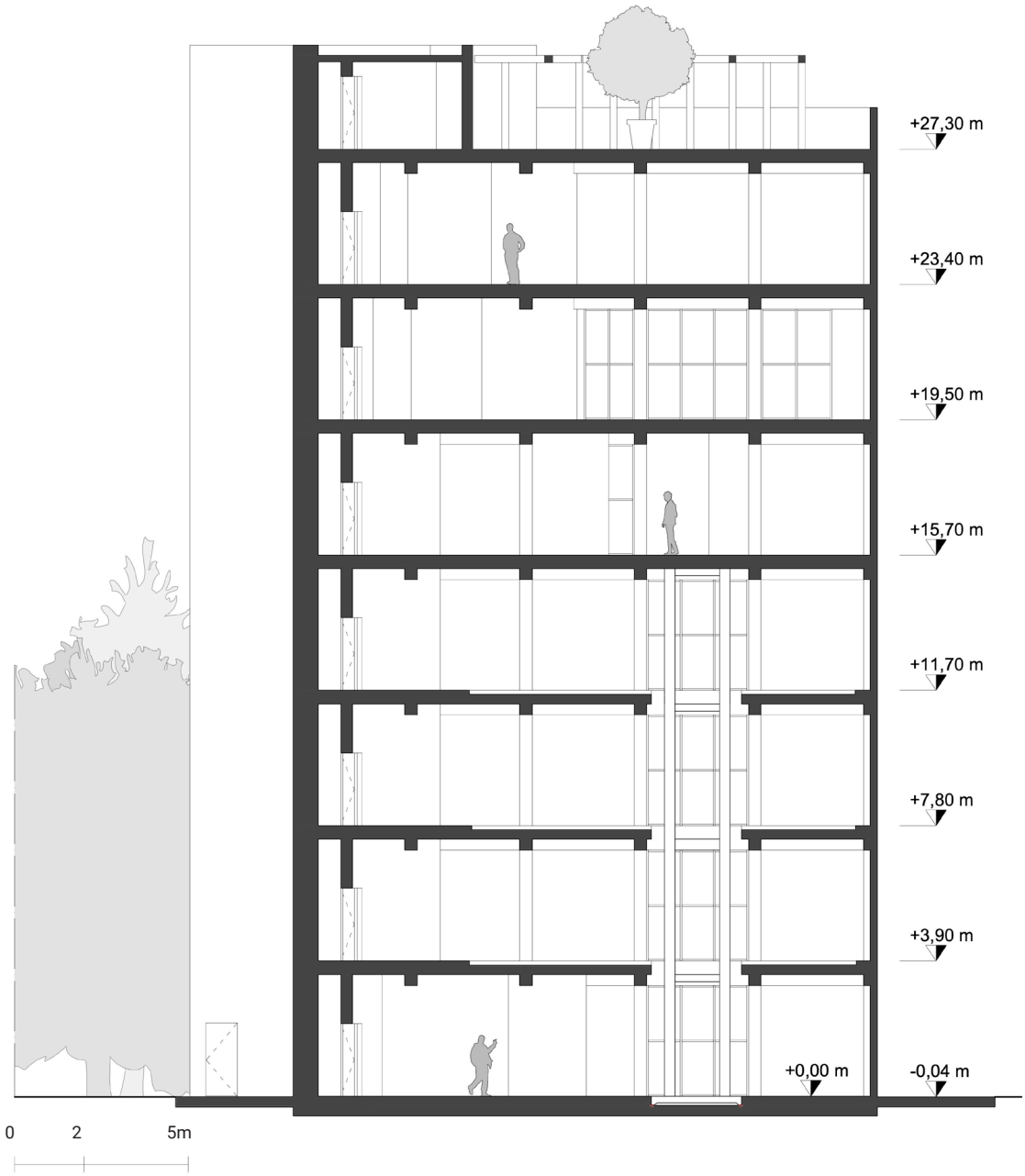
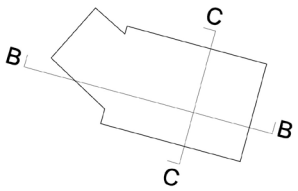
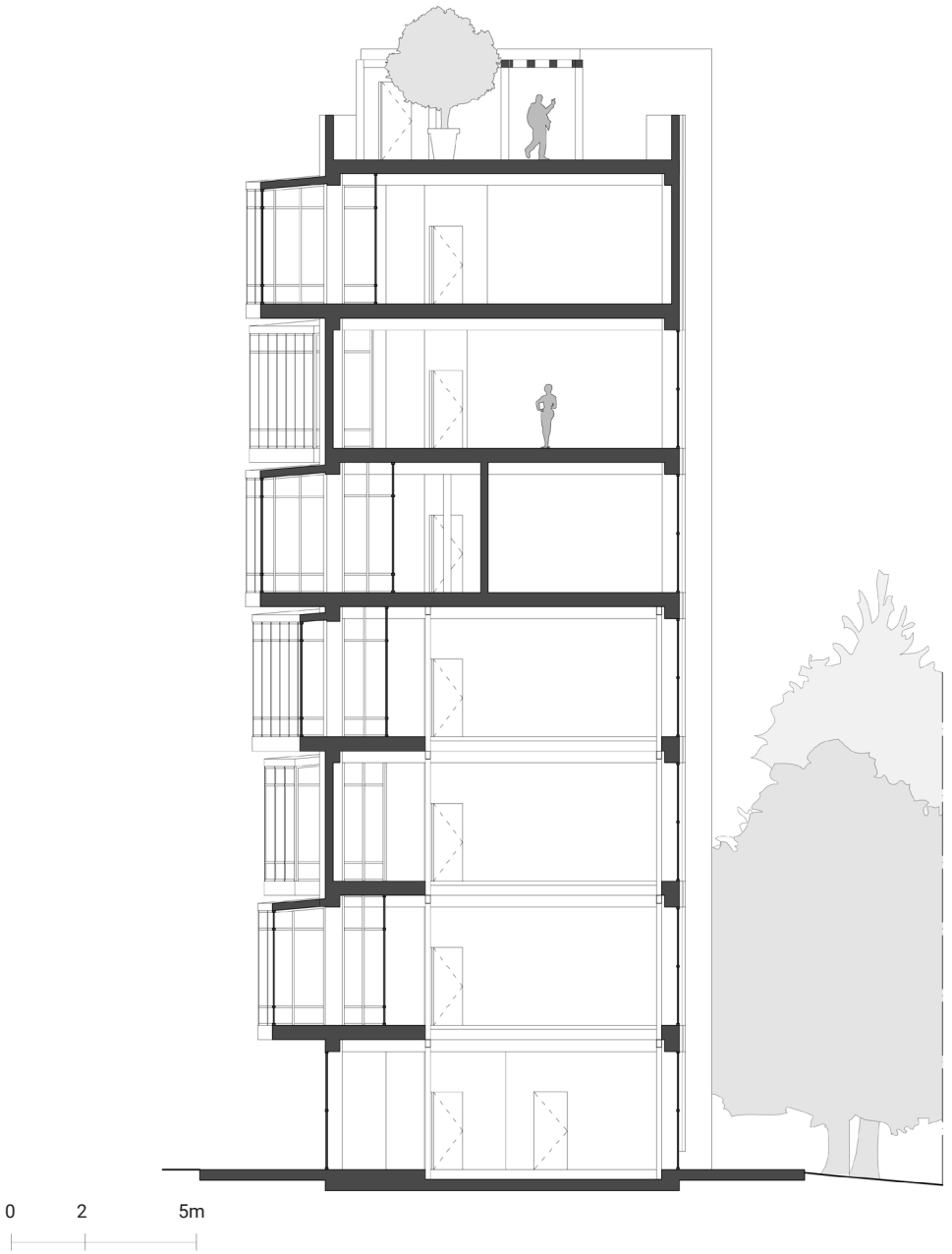


Figura 55: Sezione CC, scala 1:200.

Fonte:
Elaborazione propria.





1.3.6 Laboratori in movimento

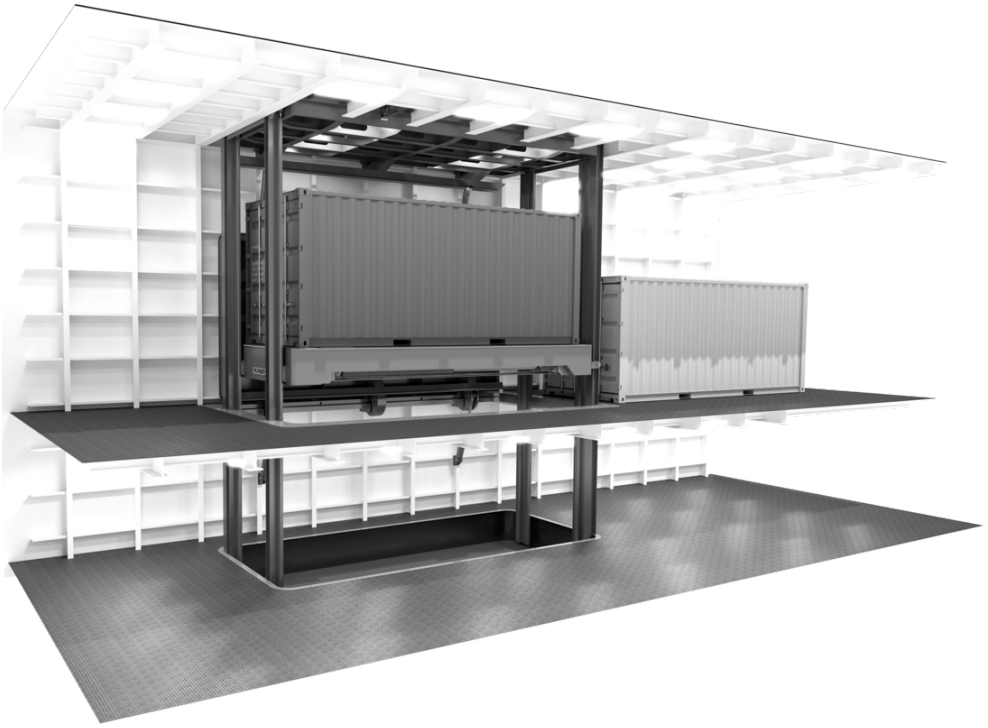
Le necessità descritte dal bando di concorso relative agli ambienti laboratoriali includono la possibilità di accogliere container adibiti alla ricerca, con la relativa strumentazione preallestita. I container, secondo quanto descritto, devono poter essere intercambiabili durante la vita utile dell'edificio per poter rispondere alle mutate esigenze di ricerca nel tempo.

Figura 56-57: L'elevatore di container.

Fonte: PALFINGER AG. (2020). Container Elevators | PALFINGER MARINE. https://www.palfingermarine.com/en/deck-equipment/access-equipment/container-elevators

La Circular Tower, avente ogni piano riscaldato, richiede un sistema capace di accogliere i container all'interno del piano terra per poi essere trasportati ai piani superiori. La richiesta è di tre container per piano, per tre piani.

Ispirandosi a sistemi elevatori utilizzati all'interno delle navi portacontainer è stata progettata una bucatura nei solai ai quali applicare il sistema elevatore. In questo modo il container può giungere al piano e attraverso dei binari collocati nella pavimentazione è possibile far scorrere il laboratorio mobile nella posizione desiderata. Le immagini rappresentative riportate sono state richieste all'azienda Palfinger che utilizza questo sistema per il carico/scarico di container, merci e personale tra i ponti della nave.



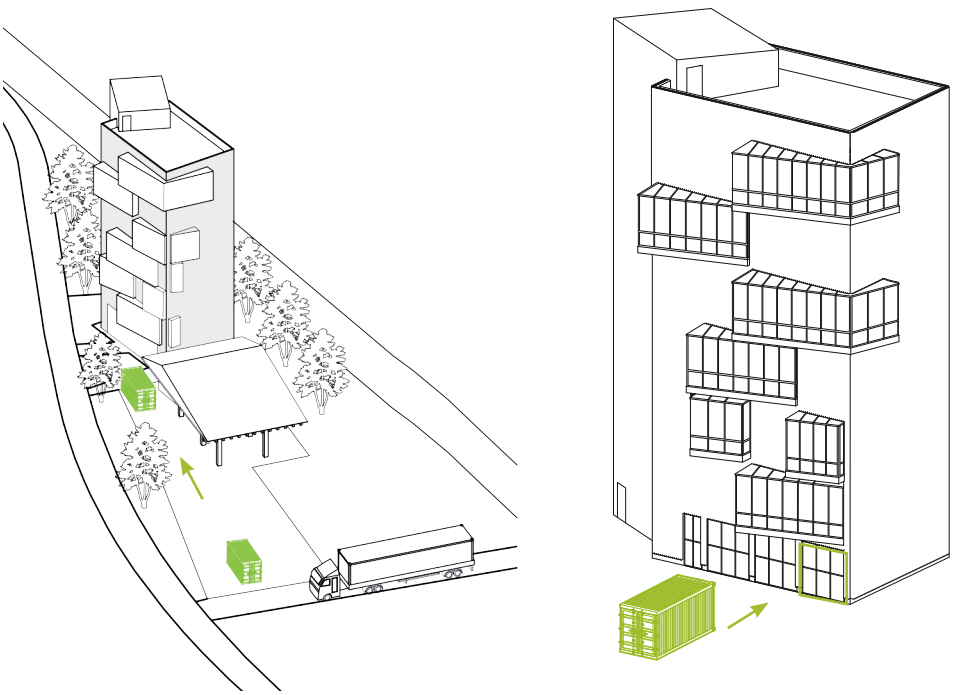
PALFINGER

Gli spostamenti del container

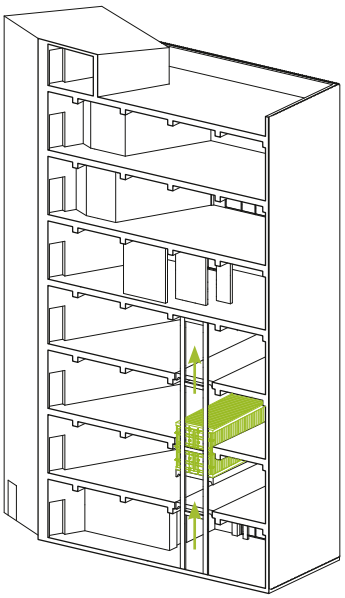
Il container giunge al sito di progetto mediante trasporto su ruota e scaricato nell'area limitrofa all'edificio preesistente, poiché consente lo spazio di manovra del mezzo e risulta essere l'area più vicina al collegamento carrabile.
Successivamente il container viene spostato all'interno della Circular Tower usando l'apertura a Sud-Est, progettata in modo possa essere aperta totalmente. L'ingresso da questo apertura permette la salita laterale del container sull'elevatore che è posto in posizione più baricentrica.

Figura 58: Schema della movimentazione dei container.

Fonte:
Elaborazione propria.



In tal modo è possibile sollevare e collocare il laboratorio al piano desiderato e una volta cessata la sua funzione rimuoverlo limitando al minimo gli spostamenti degli altri container.
I container posizionati sul lato Est risultano indipendenti mentre quelli più ad Ovest sono vincolati al movimento del container centrale.
Sono state ipotizzate differenti tipologie di laboratori, descritte nello schema presente nella pagina successiva, indicandone per ogni categoria i sistemi impiantistici necessari.



Sustainable mobility workshop

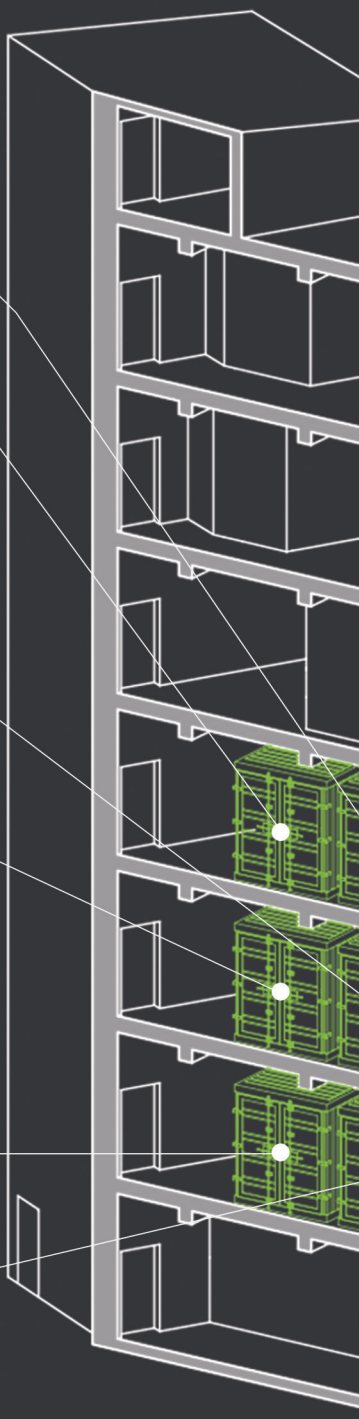
Systemic design workshop

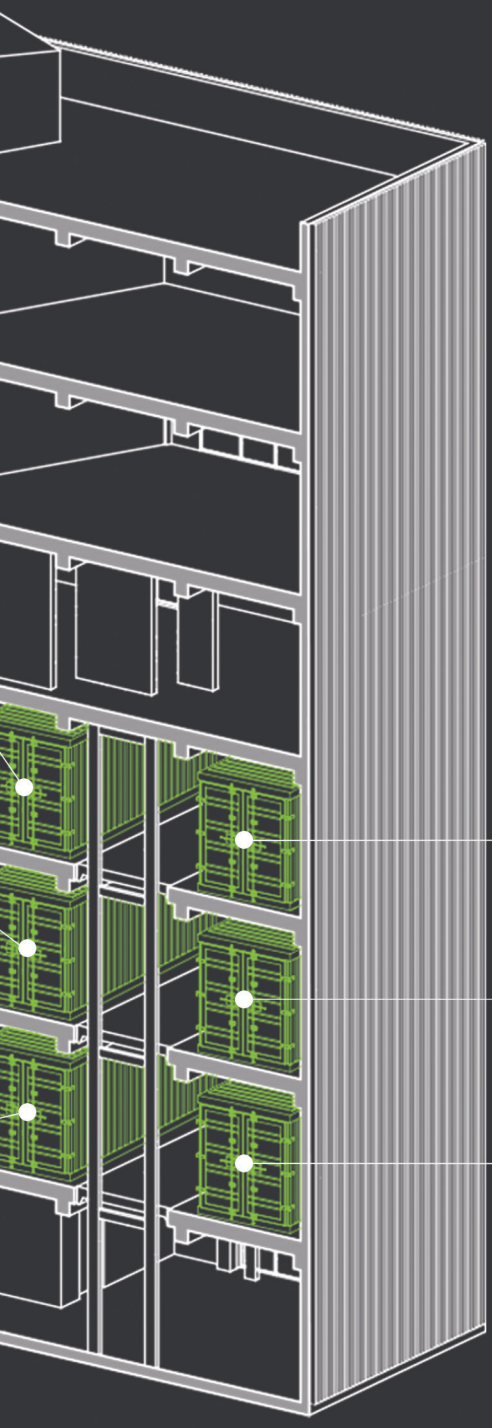
Energy technology development

Wood construction workshop

Fablab

Fablab





REQUIREMENTS

Water connection

Electrical connection

Mechanical ventilation

Microstructures workshop

Environmental impact office

BIM laboratory

Figura 59: Layout di configurazione e funzioni ipotizzate dei container.

Fonte:
Elaborazione propria.

L'immagine 60 illustra un container durante il processo di elevazione. Inoltre, osservando i solai, si nota come quelli relativi al piano di ricerca in corrispondenza dell'ingombro dei laboratori, siano stati progettati escludendo il massetto impiantistico, ottenendo maggiore spazio in altezza, per poter ridurre la differenza di quota tra il pavimento interno dei container e quello del piano.

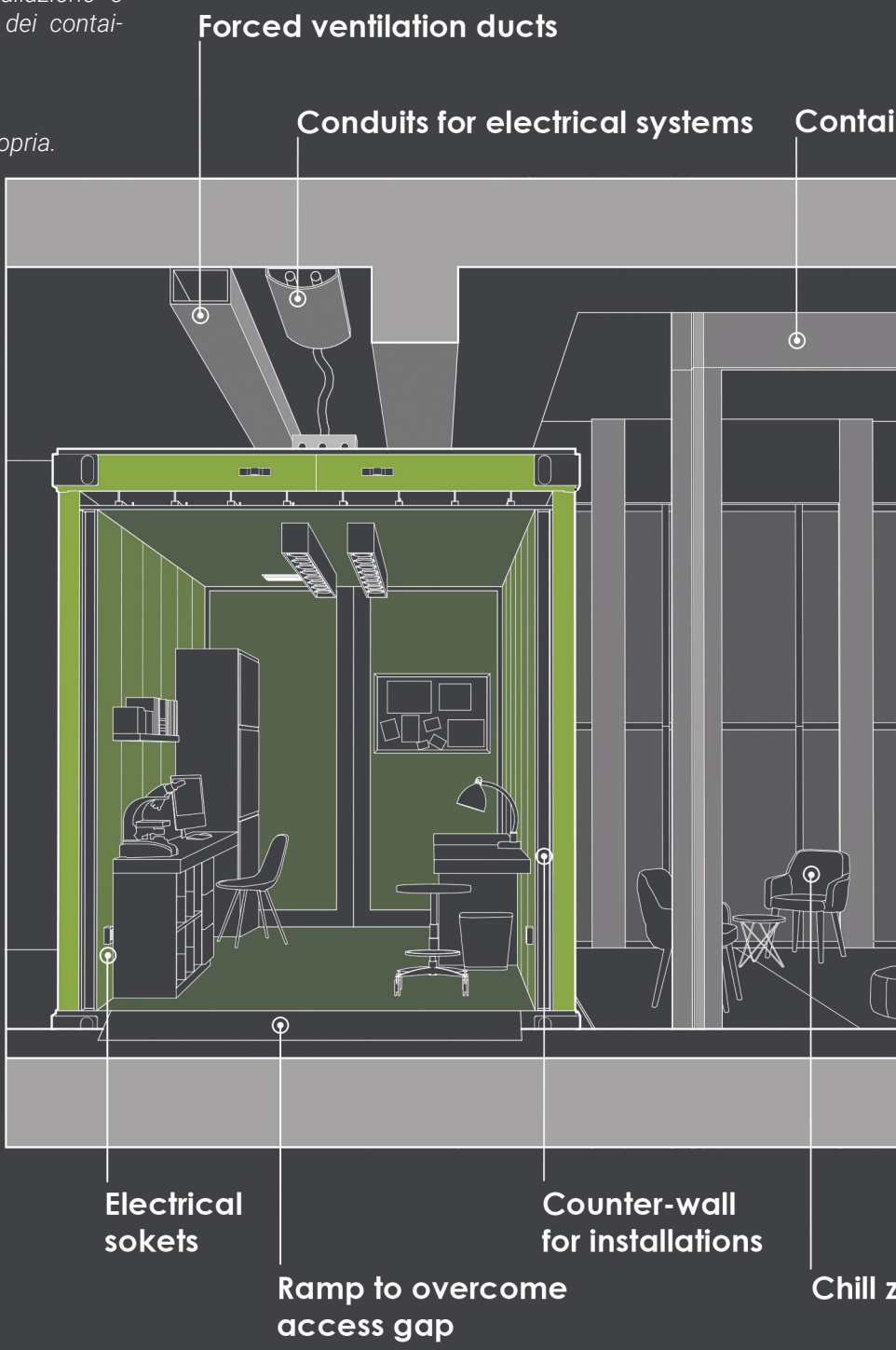
Figura 60: Sezione prospettica della Circualr Tower.

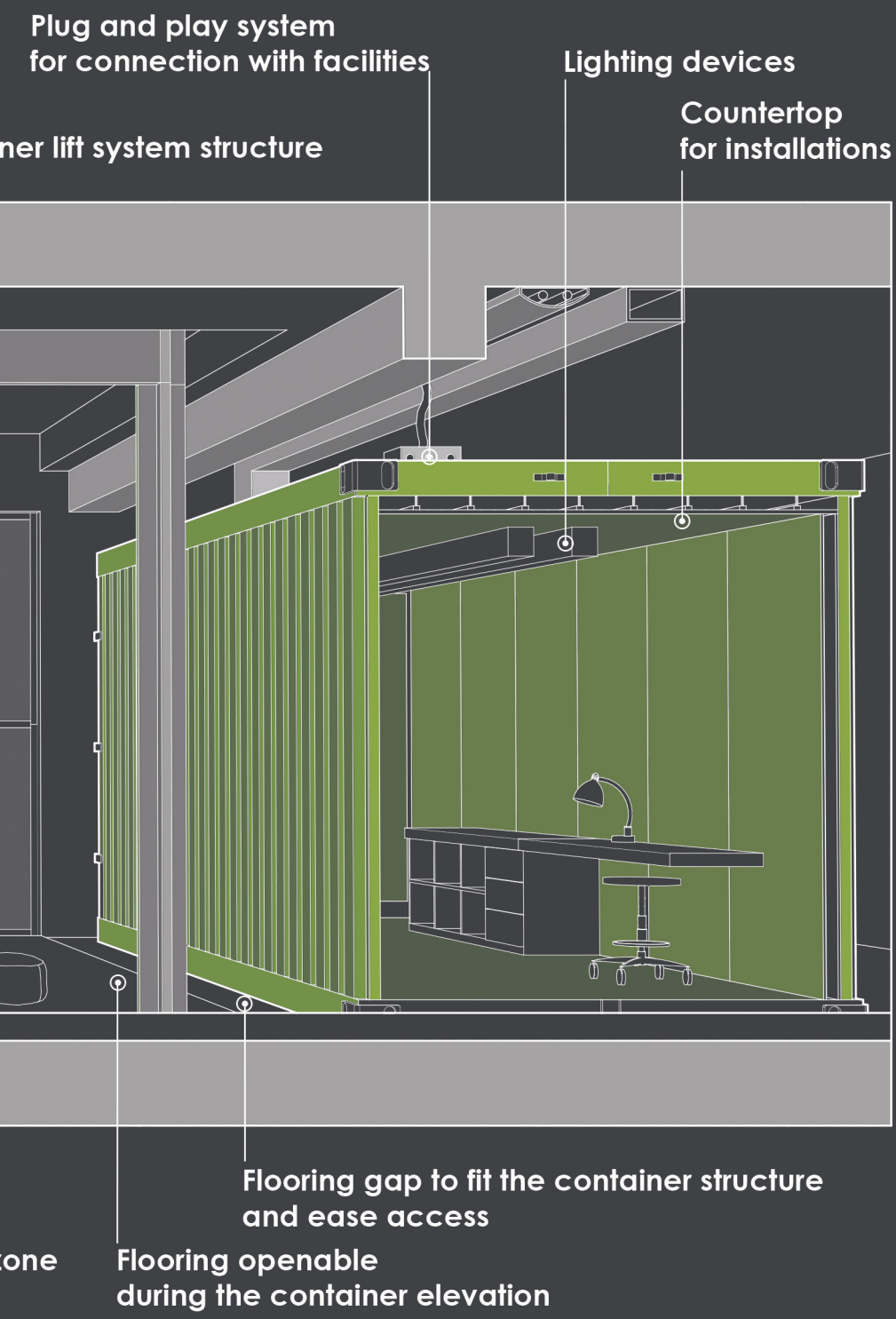
Fonte:
Elaborazione propria.

Gli impianti di aerazione sono collocati in modo da non interferire con la movimentazione dei laboratori preallestiti. Inoltre, i container, giunti al piano desiderato, verranno connessi tramite un sistema *plug and play* agli impianti di riscaldamento, di aerazione forzata ed elettrici, posto sul soffitto.
Alcuni di essi potrebbero necessitare di un allaccio idrico e verrebbero collocati nella posizione più vicina al vano scala poiché adiacente alla colonna idrica.

Figura 61: Installazione e funzionamento dei container.

Fonte:
Elaborazione propria.




Plug and play system
for connection with facilities
Lighting devices
Countertop
for installations
ner lift system structure
Flooring gap to fit the container structure
and ease access
one
Flooring openable
during the container elevation

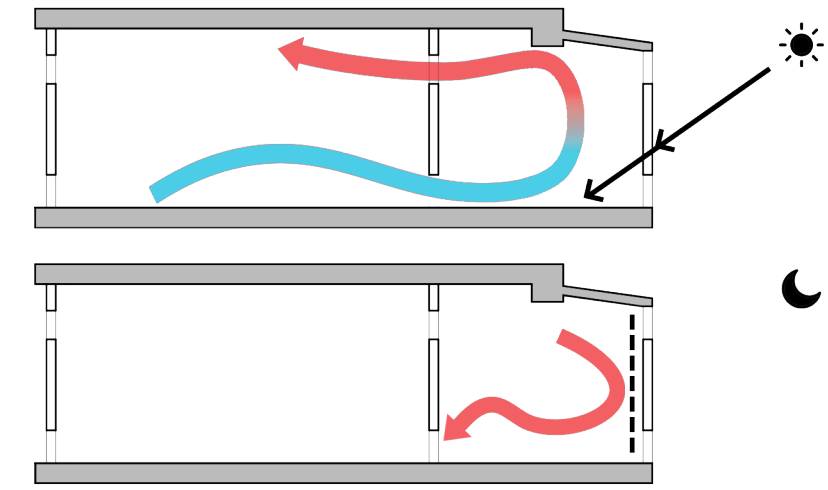
1.3.7 Le serre bioclimatiche

La scelta di sostituire il semplice involucro trasparente tradizionale con il sistema di serre bioclimatiche ha permesso l'incremento dello spazio interno, creando zone filtro in cui potersi rilassare e conversare circondati, dalla vegetazione, osservando i punti panoramici che il sito di progetto offre.
Inoltre, queste serre offrono diversi benefici al sistema edilizio tra cui la riduzione dei costi di riscaldamento invernali e di raffrescamento estivi.
Il funzionamento delle serre varia dal periodo estivo a quello invernale, come è mostrato nella figura 62. Nel periodo diurno invernale la serra è predisposta per immagazzinare calore solare attraverso le sue superfici trasparenti e, mediante un ricircolo d'aria, il calore viene trasferito nell'ambiente interno. Durante la sera, quando le temperature si abbassano e non vi sono più guadagni solari è necessario utilizzare i tendaggi per impedire al calore di dissiparsi verso l'esterno. Gli stessi tendaggi andranno utilizzati nel periodo estivo, durante il giorno, per limitare l'eccessivo surriscaldamento, in concomitanza alla generazione di flussi d'aria con le aperture a Nord.
Nella fase notturna estiva è possibile raffrescare l'ambiente con il medesimo flusso.

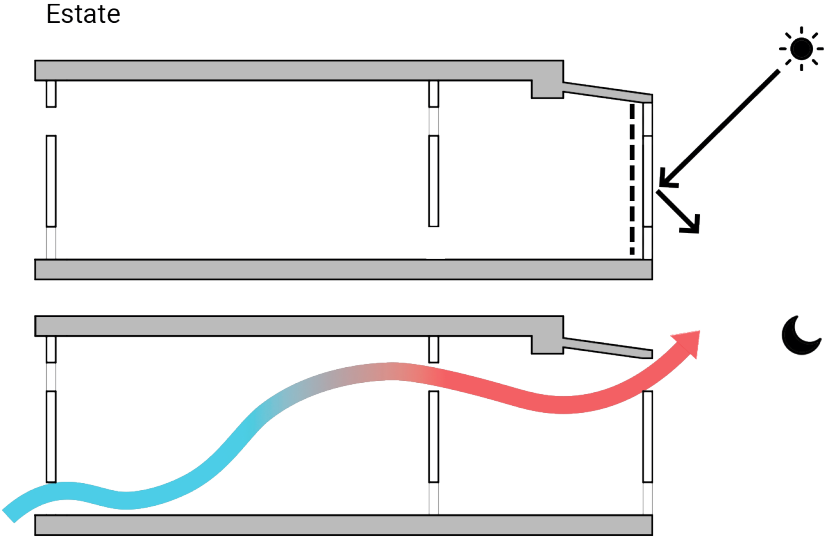
Figura 62: Funzionamento schematizzato delle serre nel periodo invernale ed estivo.

Fonte:
Elaborazione propria.

Inverno



Estate



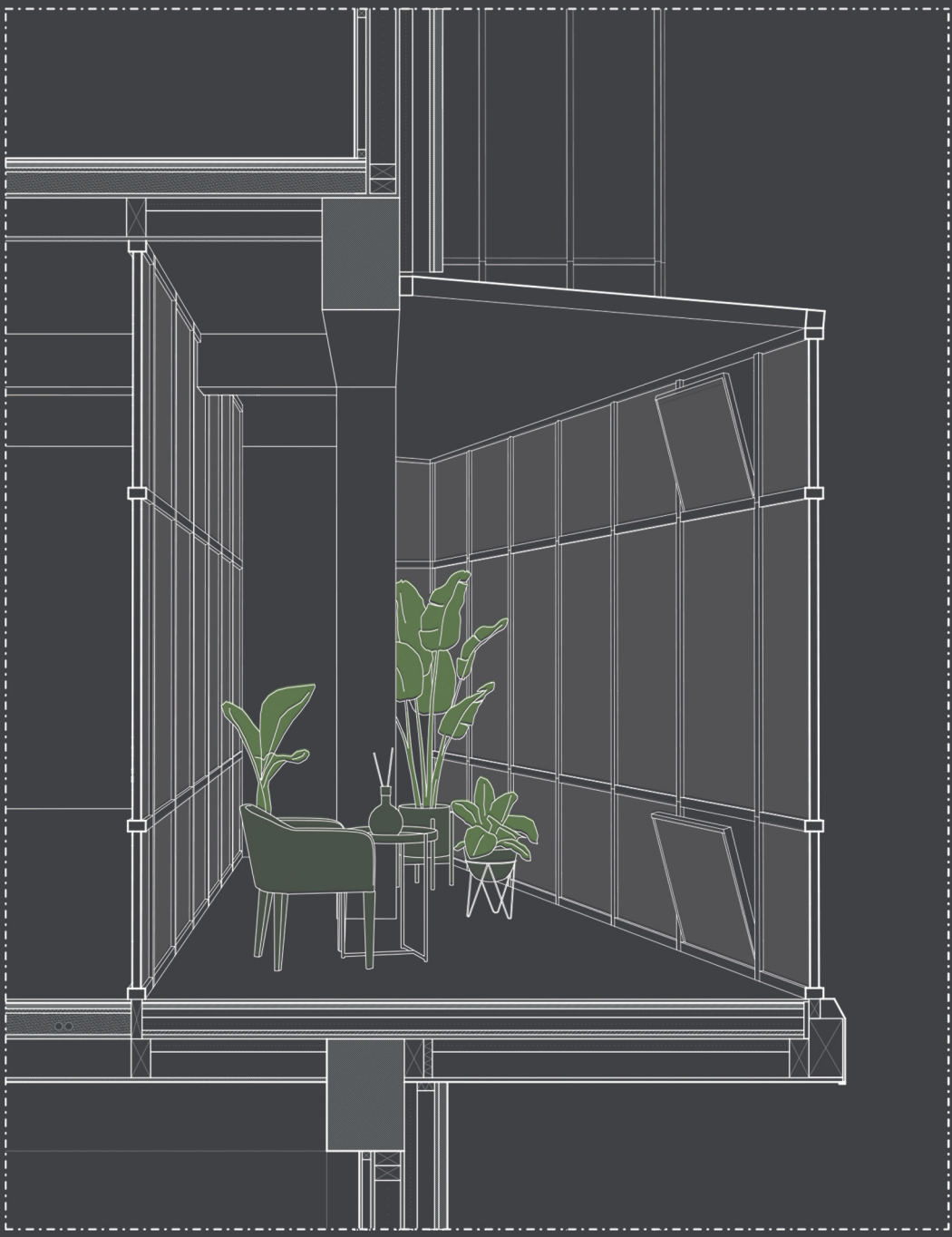


Figura 63: Sezione prospettica tipo di una serra bioclimatica della Circular Tower.

Fonte:
Elaborazione propria.

Il processo di immagazzinamento e di rilascio di calore effettuato dalle serre durante le diverse ore del giorno è reso possibile dai materiali inseriti nel solaio di copertura. I pannelli di legno truciolato mineralizzato posseggono un elevata inerzia che genera il fenomeno dello sfasamento termico, assorbendo energia in un dato momento e rilasciandola nell'ambiente confinante in un momento successivo.
Nel periodo invernale, si ottiene il trasferimento di calore dai pannelli allo spazio sottostante. Questo sfasamento temporale nel processo di trasferimento del calore contribuisce al mantenimento di temperature confortevoli per un certo tempo anche dopo la cessazione dell'irraggiamento solare e si riducono notevolmente le oscillazioni interne delle temperature.
Il solaio di copertura delle serre ha inoltre la funzione di limitare l'accesso della luce diretta all'interno dell'ambiente, evitando *discomfort* luminoso. L'illuminazione naturale avviene tramite le ampie vetrate verticali.

La scelta di progettare delle serre bioclimatiche risponde anche alla necessità dettata dal bando di concorso di realizzare un edificio esteticamente armonioso, avente un effetto segnaletico, capace di attrarre così l'attenzione anche durante un possibile utilizzo serale .

Il sistema fotovoltaico

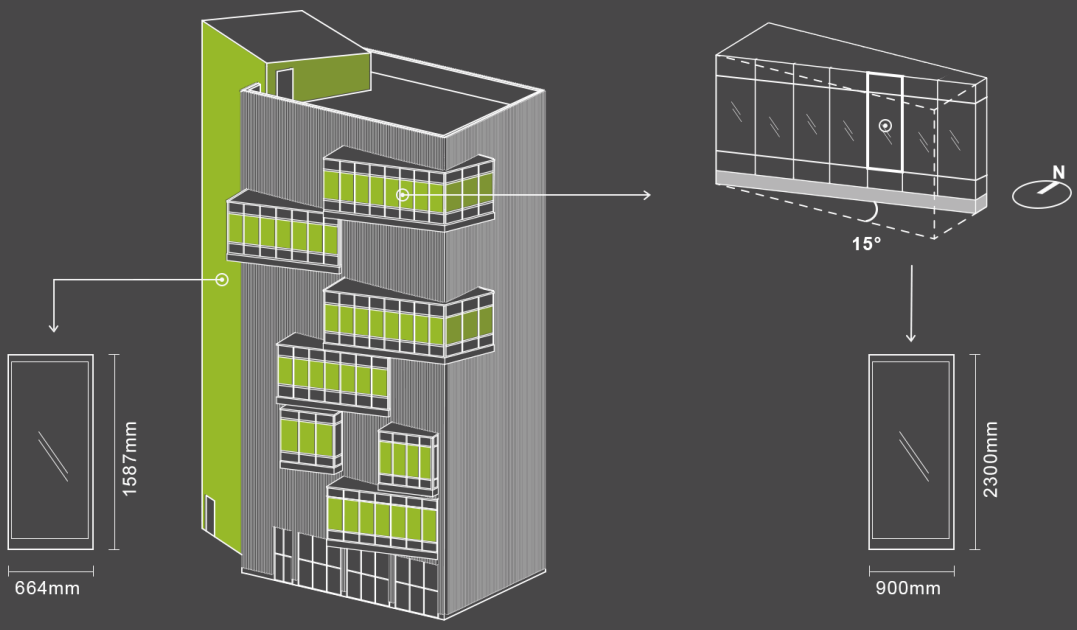
Nella Circular Tower sono state predisposte due tipologie di pannelli fotovoltaici al fine di ridurre il consumo di risorse non rinnovabili e incrementare la produzione di energia pulita per l'autoconsumo e l'autosufficienza dell'edificio.
I pannelli FV trasparenti sono inseriti in sostituzione dei serramenti che compongono gli elementi verticali delle serre. Hanno una dimensione rettangolare di 230x90 cm con un'area di circa 2 m^2. Il tipo di cella FV installata è monocristallina a bassa densità permettendo un elevata trasparenza del pannello e una trasmissione luminosa del 43%. La potenza di picco raggiunta da questi pannelli è di 111 Wp/m^2.
Come precedentemente descritto, gli elementi verticali delle serre sono stati orientati di 15° verso Sud per massimizzare la captazione di luce solare diretta.
La seconda tipologia, ovvero i pannelli fotovoltaici integrati nell'involucro del vano scala, permettono di raggiungere il fabbisogno energetico annuo. Le dimensioni di questo pannello, descritte nella figura 64, sono 158x66 cm per un'area di circa un metro quadro. La colorazione è *Light Grey* e la potenza di picco raggiungibile è di 132 Wp/m^2. I dati tecnici dei pannelli sono stati ottenuti dalle schede tecniche dei produttori: Onyx Solar [8] (pannello trasparente) e Solaxess [9] (pannello Light Gray).

Figura 64: Indicazioni sul collocamento e sulle caratteristiche tecniche dei pannelli fotovoltaici della Circular Tower.

Fonte:
Elaborazione propria.

[8] Onyx Solar - Photovoltaic Glass for Buildings. (2020). https://www.onyxsolar.com/it/

[9] SOLAXESS – White & Color Solar Technology. (2021). https://www.solaxess.ch/



MECHANICAL DESCRIPTION	
Length	2300 mm
Width	900 mm
Thickness	9,8 mm
Surface area	2,07 m^2
Cell type	6” Mono 158 Crystalline

Glass properties	
Light Transmission	43%
U-value	5.2 W/m^2K
Peak Power	111,1 Wp/m^2

MECHANICAL DESCRIPTION	
Length	1587 mm
Width	664 mm
Thickness	15 mm
Surface area	1,05 m^2
Cell type	Mono c-Si Crystalline

Glass properties	
Colour	Light Grey
Peak Power	132 Wp/m^2

1.3.8 Il ciclo dell'acqua

A causa della forte crescita della popolazione, dell'ampia espansione delle aree urbanizzate e del grande aumento dell'industrializzazione, è accresciuta costantemente la domanda di acqua dolce. Emerge così la necessità di operare un forte cambiamento del modo in cui questa risorsa viene utilizzata, gestita e condivisa. Teclab individua tra i temi del bando di concorso la limitazione del consumo di risorse tra cui quelle idriche.
Uno degli obiettivi è la progettazione di un edificio che tenda al ciclo zero, minimizzando il consumo totale di acqua, massimizzando l'uso dell'acqua piovana come fonte alternativa e riducendo lo scarico di acque reflue così da favorire il ritorno dell'acqua in uscita dall'edificio alla fonte di approvvigionamento originale. [10]
La riduzione dei consumi e l'impiego di sistemi per il recupero e riuso consentono una riduzione complessiva del consumo di acqua del 50%.
Le acque piovane vengono captate sulla copertura grazie alla tecnologia *blue roof* (figura 66) e successivamente incanalate, mediante i pluviali, nel bacino di raccolta interrato limitrofo all'area di progetto.

Figura 65: Sezione schematica del ciclo dell'acqua nella Circular Tower.

Fonte:
Elaborazione propria.

[10] Campagnoli, A. (2018). Soluzioni progettuali per la sostenibilità idrica degli edifici – l'edificio residenziale monofamiliare [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino.

STREAMS OF WATER

1 Treatment and accumulation rainwater

2 Treatment and accumulation gray water

3 Black water purification / sewer connection

4 Public water network

Meteoric waters

Potable water

Gray waters

Black waters

Water reintroduced into the environment

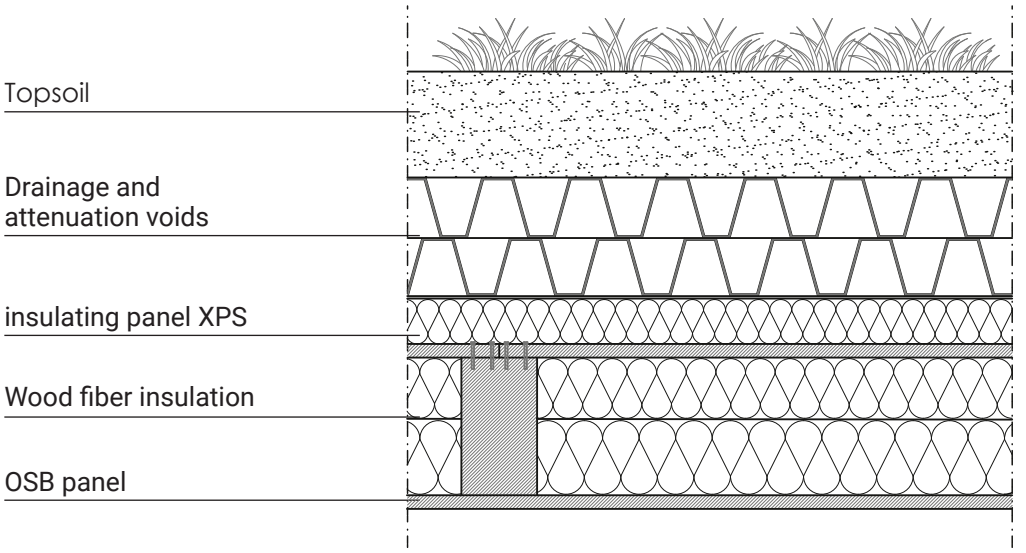
Permeable flooring

Il bacino di raccolta è dimensionato sulla base del regime pluviometrico locale.
Queste acque, in seguito al processo di filtrazione avvenuto nel bacino di raccolta mediante filtri meccanici a diversa granulometria, possono essere riutilizzate per l'irrigazione della vegetazione presente nelle serre.
L'acqua potabile prelevata dall'acquedotto viene definita come acqua grigia in seguito all'utilizzo da parte degli utenti mediante gli apparecchi idrici.
Le acque grigie verranno anch'esse raccolte in un secondo bacino e successivamente al loro trattamento potranno essere utilizzate per i wc. L'utilizzo nei lavabi non è concesso dalle normative attuali anche se venisse effettuata la potabilizzazione. Infine, le acque nere derivate dall'utilizzo dei wc, possono essere conferite nella rete pubblica fognaria oppure trattate nella fossa biologica per poi essere rilasciate nell'ambiente.
Per ottenere un ciclo zero idrico ideale sarebbe necessario essere geograficamente localizzati in un area più piovosa. Inoltre, l'assenza di un allaccio idrico all'acquedotto dovrebbe essere compensato dalla possibilità di potabilizzare le acque grigie e meteoriche mediante sistemi ad azoto. Infine, l'utilizzare della fossa biologica dovrebbe sostituire l'allaccio alla rete fognaria pubblica.

Figura 66: Stratigrafia del sistema blue roof utilizzato nel solaio di copertura della Circular tower.

Fonte:
Elaborazione propria.

Il sistema del *blue roof* consente di assorbire l'acqua piovana in eccesso e di far fronte a periodi di siccità prolungata. Il terriccio e vuoti di attenuazione del drenaggio filtrano e immagazzinano l'acqua piovana, convogliandola ai pluviali e trasportandola al volume di trattamento e stoccaggio.



1.3.9 La progettazione antincendio: Norme SIA

Approfondendo la normativa antincendio svizzera si è constatato che per gli edifici con superficie utile superiore ai 900 m^2 per piano è necessaria una rampa di scale con un uscita di emergenza direttamente sull'esterno. [11]
La superficie del piano è calcolata considerando il perimetro della pianta, racchiuso e coperto, entro le dimensioni esterne, senza balconi e terrazze. Non sono tuttavia deducibili le sezioni delle pareti divisorie dei piani in quanto le stesse influiscono direttamente sulle vie d'evacuazione.
Si devono tenere in considerazione le lunghezze delle vie di emergenza secondo l'articolo 8 OLL 4.
Le uscite necessarie, secondo il capoverso 2, che non vengono utilizzate in condizioni normali di esercizio, possono essere contrassegnate come uscite di emergenza. Esse valgono allora come vie di circolazione principali e devono quindi rispondere ai requisiti minimi relativi (porte 0,9 m/scale 1,2 m).
Per una corretta progettazione delle vie di evacuazione è necessario che, in caso di pericolo, l'edificio possa essere abbandonato in qualsia-

[11] Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2016b). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 7, Rampe di scale e uscite).

si momento in modo rapido e sicuro. I passaggi che in caso d'emergenza servono da vie d'evacuazione devono essere segnalati in modo adeguato e vanno sempre mantenuti liberi da ostacoli.

La via d'evacuazione è definita come il tragitto più breve che una persona può percorrere da un qualsiasi posto nell'edificio per recarsi all'aperto, in un luogo sicuro.

Se le vie d'evacuazione portano a una rampa di scale o a un'uscita sull'esterno, è obbligatorio che la loro lunghezza massima sia di 35 metri.

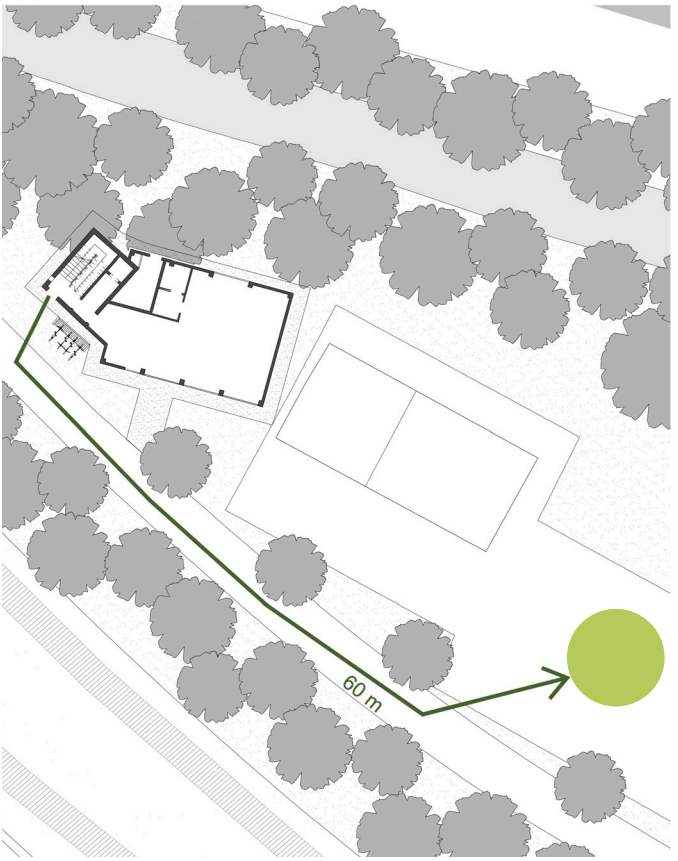


Figura 67: Schema sul percorso più breve per raggiungere il luogo sicuro all'esterno dell'edificio.

Fonte: Elaborazione propria.

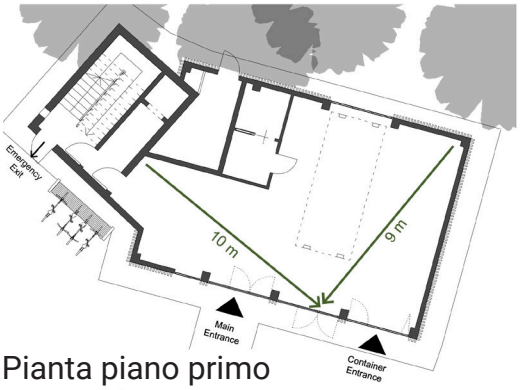
La lunghezza di una via d'evacuazione è misurata in linea retta nei locali e lungo il tragitto nei corridoi. Non è misurato il tratto fra le rampe di scale e l'esterno.
All'interno dell'ambiente, ogni punto deve distare non più di 35 m dall'uscita più vicina che porta a un luogo sicuro all'esterno o a una rampa di scale. [12]
Le porte sulle vie d'evacuazione devono sempre poter essere riconosciute come tali, essere aperte rapidamente nella direzione d'uscita senza ricorrere a strumenti ausiliari ed essere utilizzate in modo sicuro. Numero, larghezza, forma e disposizione delle uscite devono essere adeguati all'estensione e all'uso previsto dell'edificio o di parti del medesimo, al numero dei piani, ai pericoli che presenta l'azienda e al numero delle persone. La larghezza utile delle porte a un solo battente deve essere di almeno 0,90 metri. La larghezza di porte, scale e corridoi con accesso a vie d'evacuazione non può essere ridotta al di sotto della dimensione minima prescritta né da costruzioni successive né da qualsiasi altra infrastruttura. [13]

[12] Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2016). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 8, Vie d'evacuazione).
[13] Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2020). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 10, porte e uscite con accesso a vie d'evacuazione).

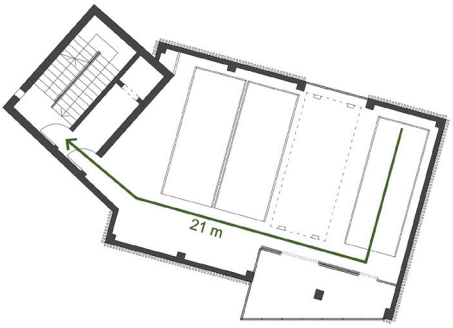
Figura 68: Schemi grafici delle vie di evacuazione in ogni piano della struttura.

Fonte: Elaborazione propria sulla base della norme antincendio SIA.

Pianta piano terra

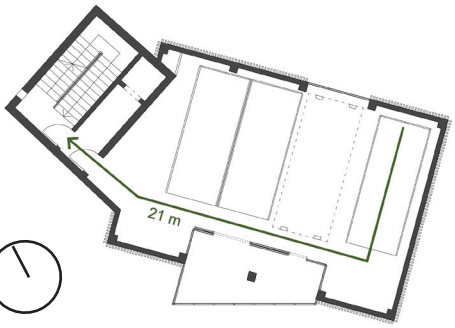


Pianta piano primo

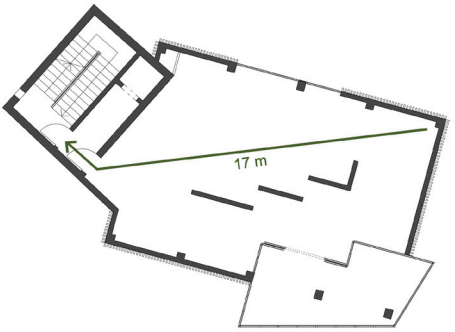


Pianta piano secondo

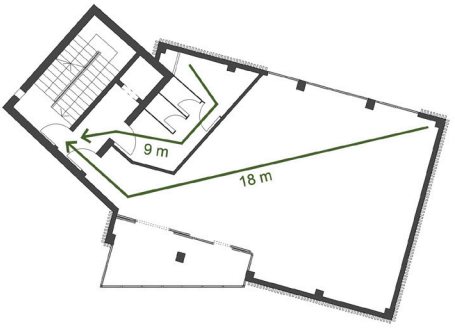
Pianta piano terzo



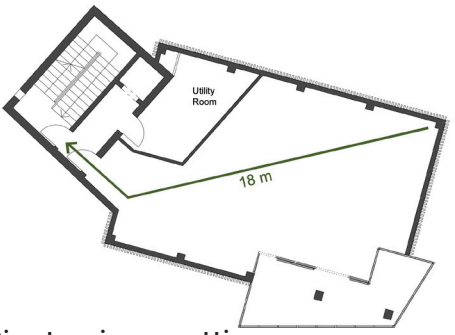
Pianta piano quarto



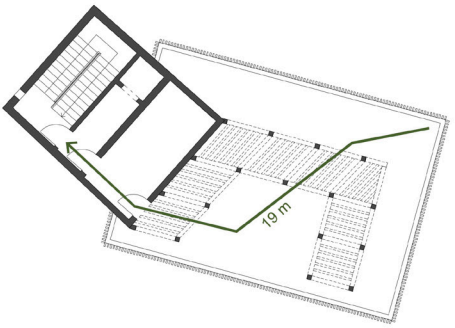
Pianta piano quinto



Pianta piano sesto



Pianta piano settimo



1.3.10 L'impianto strutturale in legno

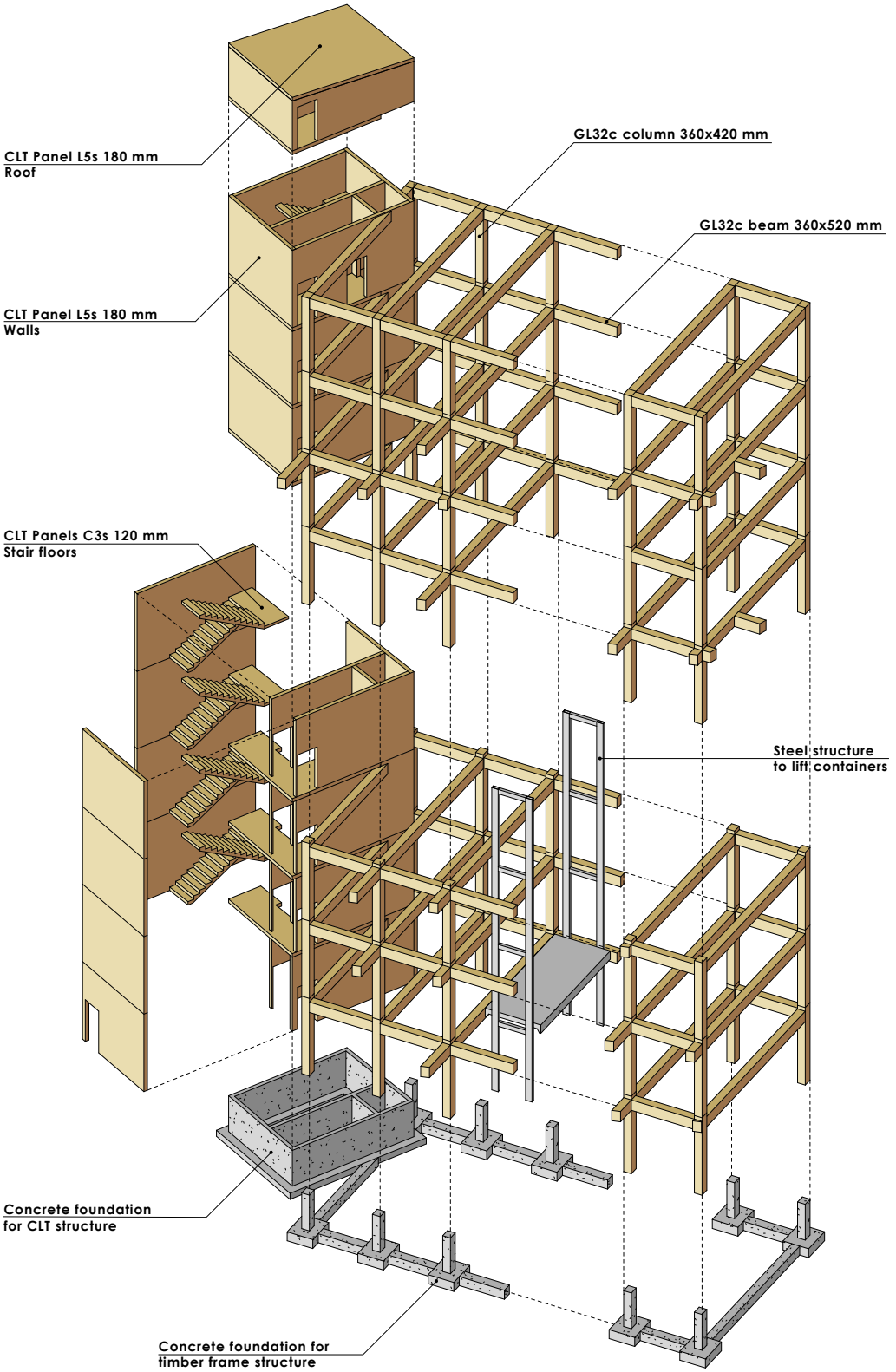
La Circular Tower è stata progettata per ospitare al suo interno eventi e mostre. La struttura in legno a telaio, che caratterizza il volume maggiore, permette di creare ampi spazi senza alcun ingombro. Questo ha permesso di ottenere tre piani adibiti a ricerca, con la possibilità di spostare liberamente i container al loro interno. Le travi in LVL di 36x52 cm hanno permesso di coprire una luce di 9 metri e i pilastri di 36x42 cm di raggiungere i 7 piani fuori terra. Inoltre, la scelta di utilizzare una struttura a telaio per il blocco centrale è stata dettata dalla possibilità di aprire maggiormente i piani verso l'esterno, utilizzando ampie vetrate.

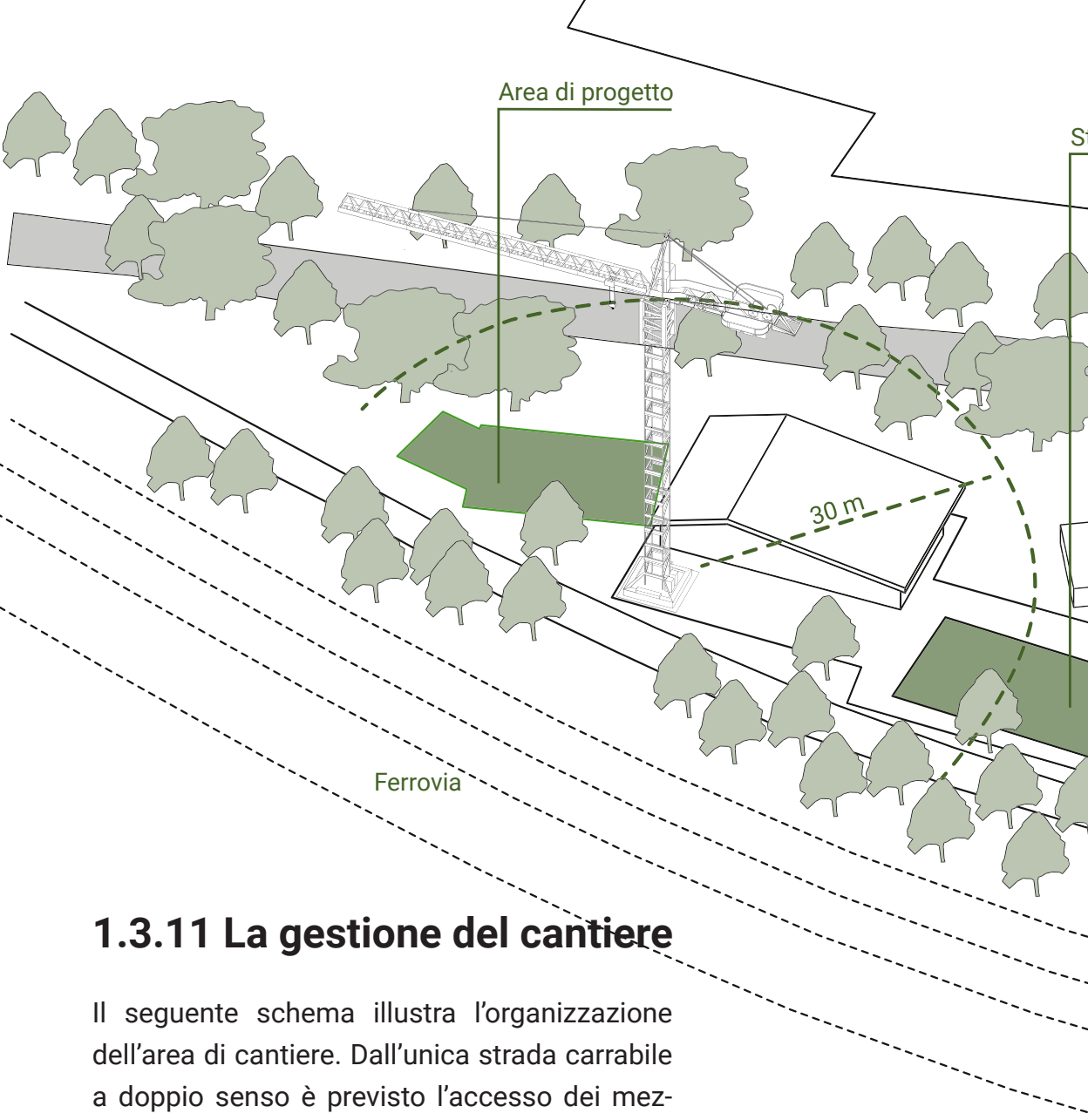
Il corpo scala è progettato con una struttura portante in CLT. Questa scelta rispecchia le caratteristiche e le richieste stesse del vano: la necessità di poca luce naturale e la sua forma scatolare lo rendono adatto a questo tipo di struttura. Anche il vano ascensore è inserito all'interno di pareti multistrato portanti, grazie alla utilizzo di un ascensore oleodinamico.

Le fondamenta sono in calcestruzzo armato e si differenziano per i due volumi. Per quello principale, a telaio, sono previsti dei plinti di fondazione puntuali, mentre il vano scala richiede un basamento a trave rovescia.

Figura 69: Assonometria strutturale esplosa, elementi primari.

Fonte: Elaborazione propria.


CLT Panel L5s 180 mm
Roof
GL32c column 360x420 mm
GL32c beam 360x520 mm
CLT Panel L5s 180 mm
Walls
CLT Panels C3s 120 mm
Stair floors
Steel structure
to lift containers
Concrete foundation
for CLT structure
Concrete foundation for
timber frame structure

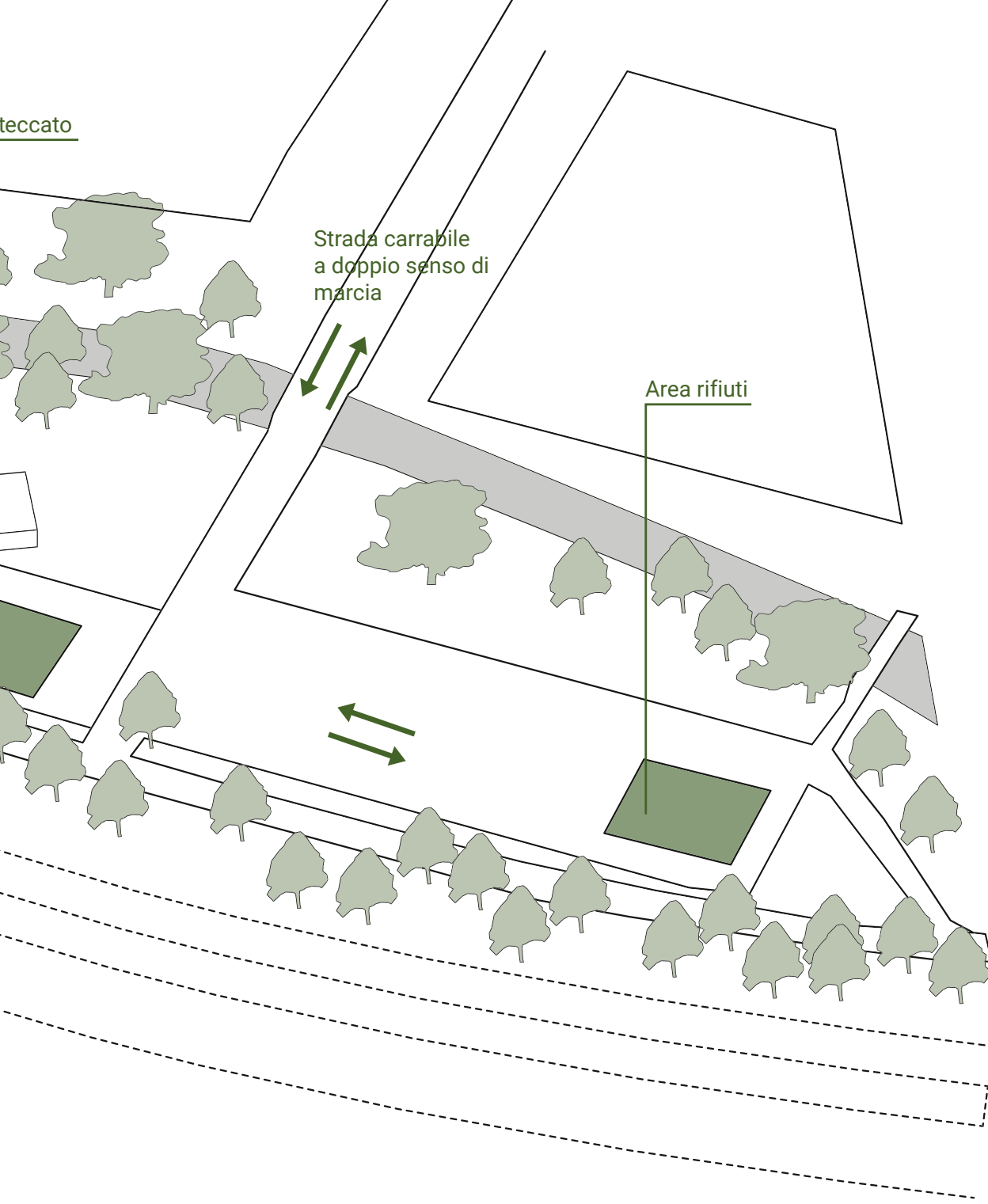


1.3.11 La gestione del cantiere

Il seguente schema illustra l'organizzazione dell'area di cantiere. Dall'unica strada carrabile a doppio senso è previsto l'accesso dei mezzi pesanti che potranno effettuare le manovre all'interno di quello che attualmente è il parcheggio. L'area a Est del sito di progetto sarà utilizzata come steccato per il deposito di materiale edile e componenti da assemblare tramite l'ausilio di una gru. Questa è stata ipotizzata con un braccio di 30 m e un'altezza di 35 per superare l'alta vegetazione e l'ostacolo definito dalla preesistenza.

Figura 70: Schema di cantiere.

Fonte: Elaborazione propria.



Può essere adibita un'area di raccolta e divisione dei rifiuti a Est del parcheggio. Utilizzando come descritto l'area non vi saranno interruzioni nell'utilizzo della pista ciclabile.

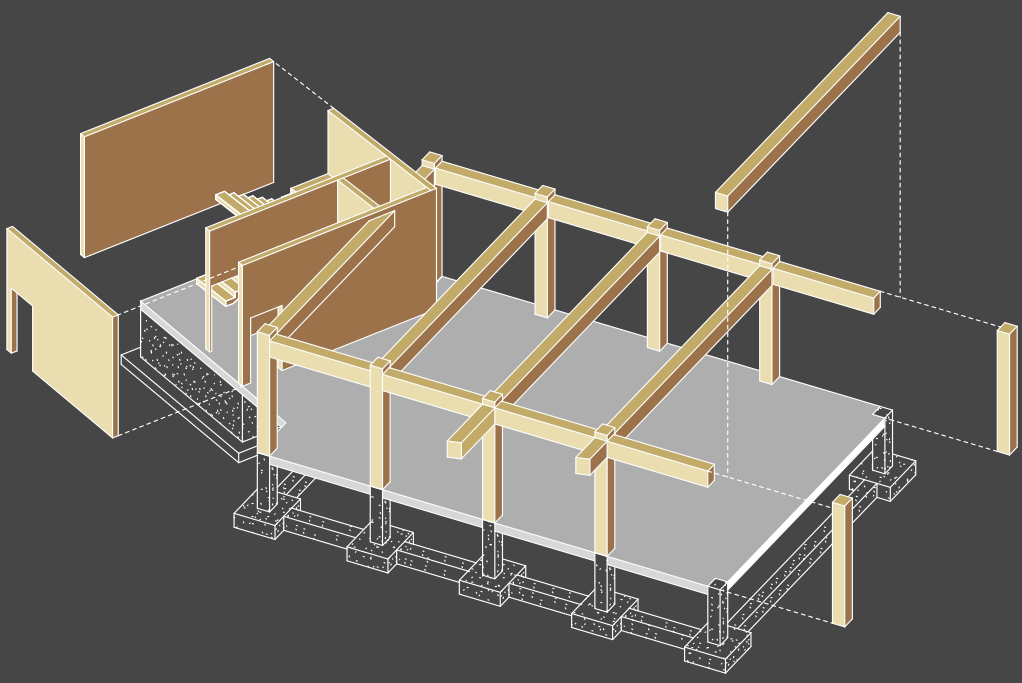
1.3.12 Le fasi di costruzione, i solai e le pareti prefabbricati

Dopo la costruzione delle fondazioni in cemento armato, gli elementi strutturali primari vengono posati piano per piano, tra cui le travi e i pilastri per il volume principale dell'edificio, le pareti e i pavimenti in CLT per il vano scala.
Per creare l'involucro dell'edificio e le solette interpiano saranno montati pannelli preassemblati, progettati per essere posati rapidamente in cantiere, per ridurre i tempi di costruzione, ma anche in previsione di una facile rimozione.
I materiali che compongono i pannelli sono stati scelti in base alla loro commercializzazione in formati ottimizzati per la decostruzione, in base al loro impatto ambientale e anche per le loro prestazioni termiche e acustiche.
In questo modo, al termine della vita utile dell'edificio, ci sarà la possibilità di separare i diversi componenti dei pannelli per riutilizzarli e/o riciclarli.

Figura 71: Schema di assemblaggio, fase 1.

Fonte: Elaborazione propria.

1. POSA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI AL DI SOPRA DELLE FONDAZIONI



Stratigrafia pannello parete: vano scala - esterno

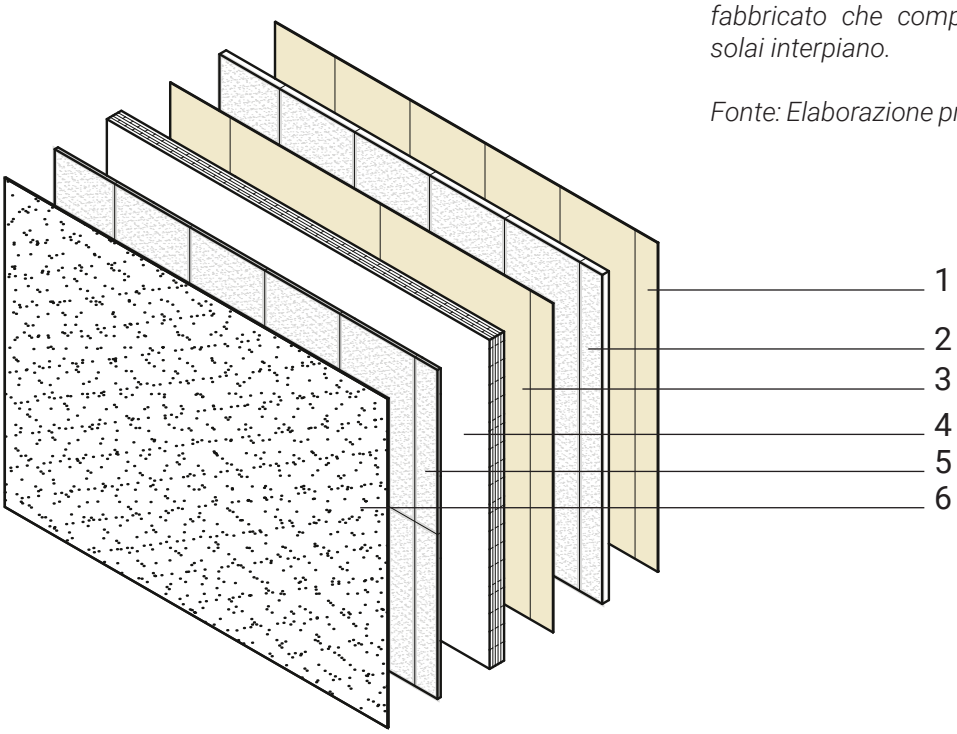


Figura 72: Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone i solai interpiano.

Fonte: Elaborazione propria.

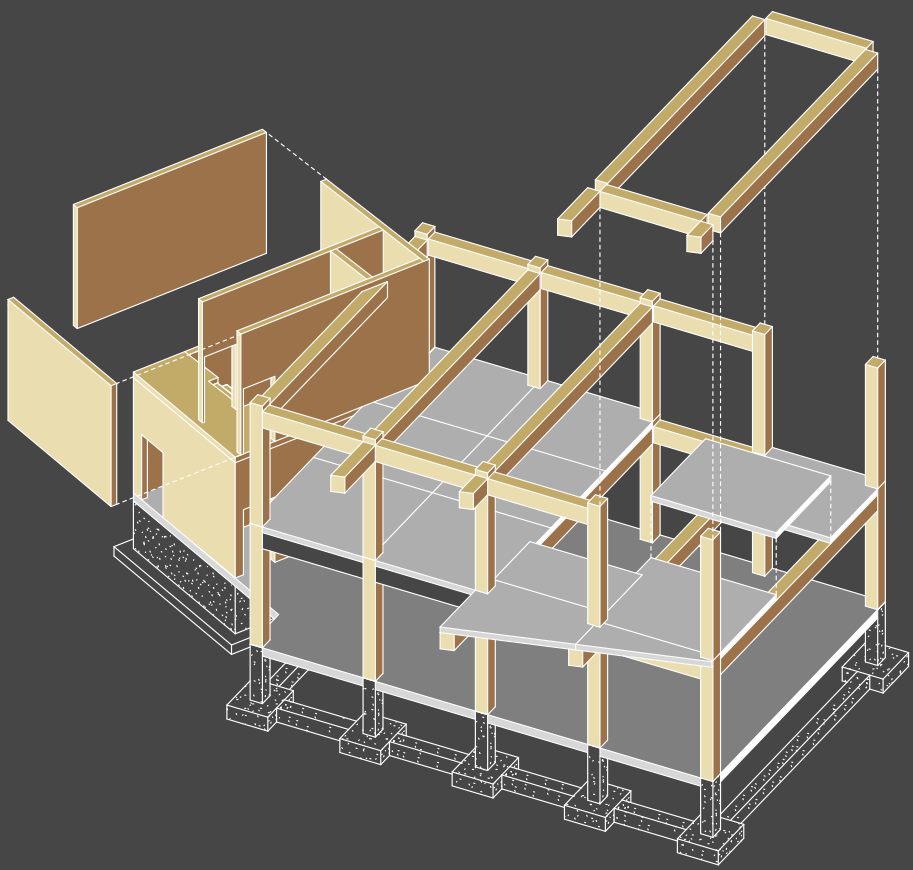
1. 18mm - Pannello OSB
2. 80mm - Pannelli isolanti in fibra di legno
3. 0,5mm - Membrana impermeabilizzante
4. 180mm - CLT 5 strati
5. 40mm - Pannelli isolanti in fibra di legno
6. 13mm - Cartongesso tipo F (GKF)

U= 0,212 W/m^{2}k S=333mm

Figura 73: Schema di assemblaggio, fase 2.

Fonte: Elaborazione propria.

2. INSTALLAZIONE DEI SOLAI PREFABBRICATI E PROSEGUIMENTO DELLA COSTRUZIONE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI DEI PIANI SUCCESSIVI



Stratigrafia pannello solaio interpiano

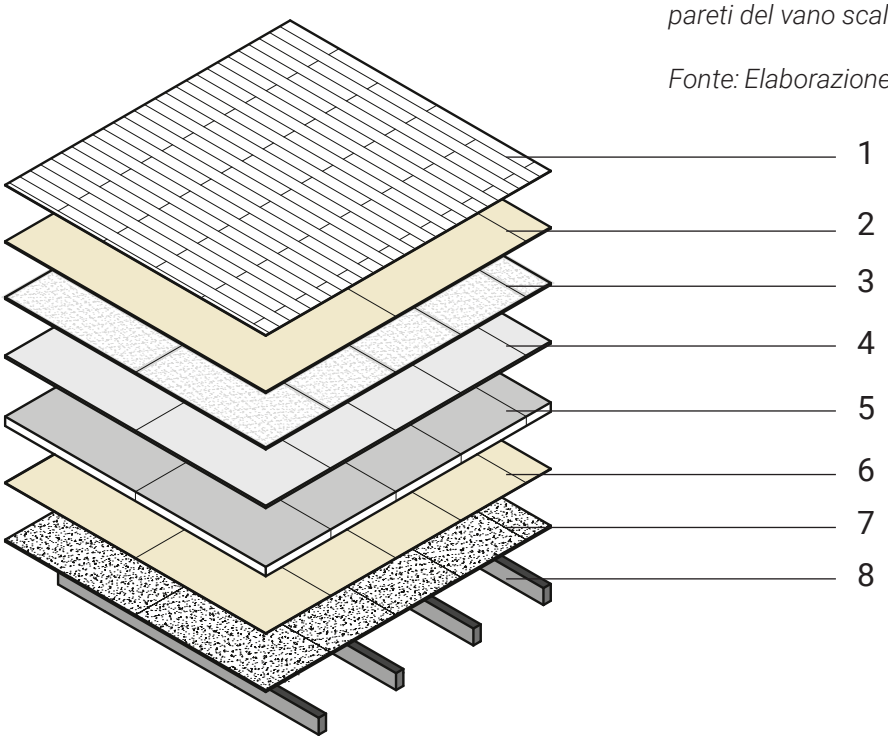


Figura 74: Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone le pareti del vano scala.

Fonte: Elaborazione propria.

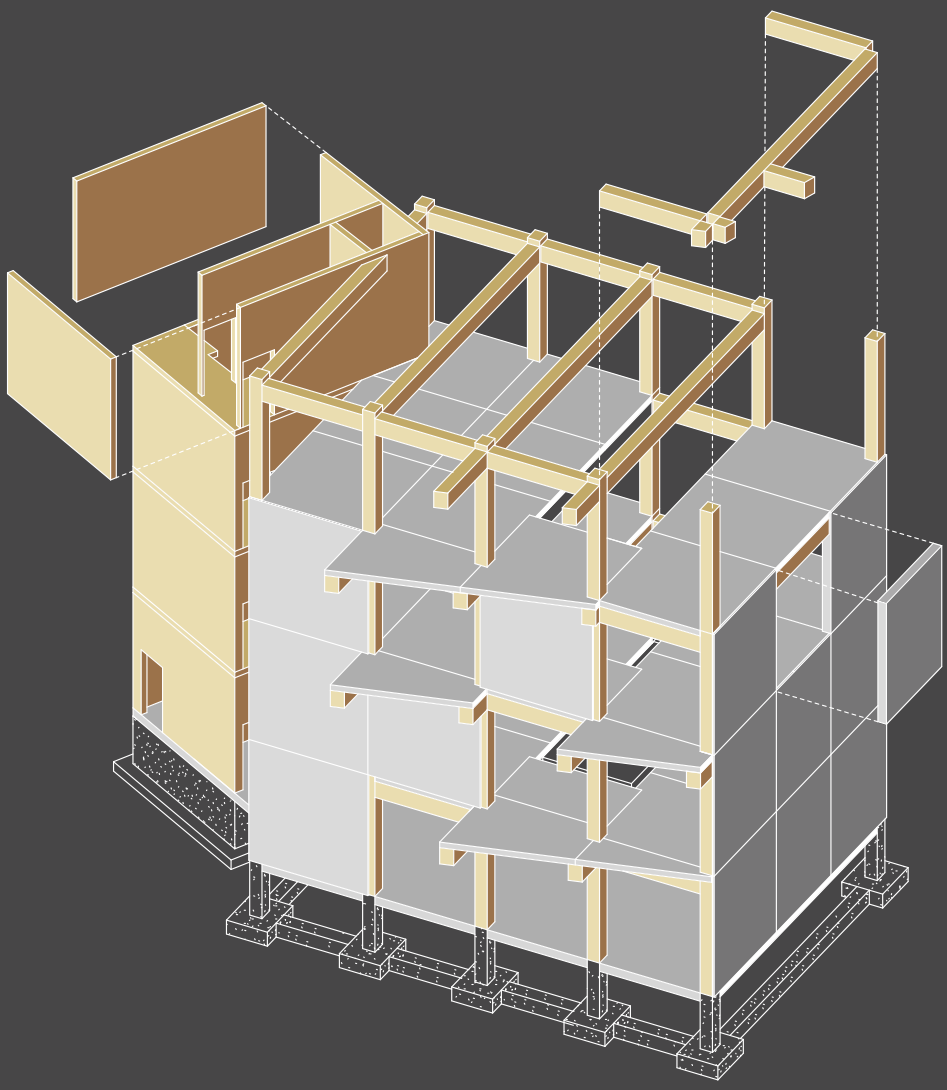
1. 14mm - Pavimentazione in legno di quercia
2. 5mm - Strato di separazione per pavimento flottante
3. 25mm - Pannello in gessofibra
4. 20mm - Pannelli isolanti in fibra di legno
5. 100mm - Massetto in legno mineralizzato
6. 5mm - Strato di separazione
7. 18mm - Pannelli OSB
8. Travetti LVL

S = 385 mm

Figura 75: Schema di assemblaggio, fase 3.

Fonte: Elaborazione propria.

3. POSA DELLE PARETI PREFABBRICATE E COMPLETAMENTO DELLA STRUTTURA PORTANTE LIGNEA



Stratigrafia pannello parete: interno - esterno

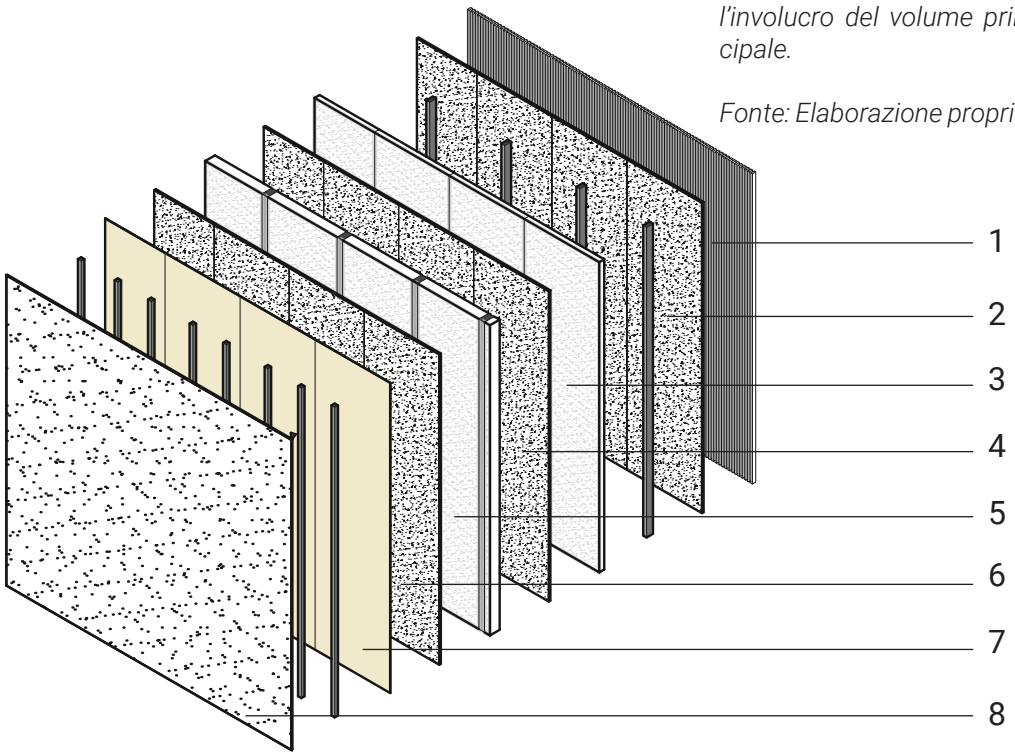


Figura 76: Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone l'involucro del volume principale.

Fonte: Elaborazione propria.

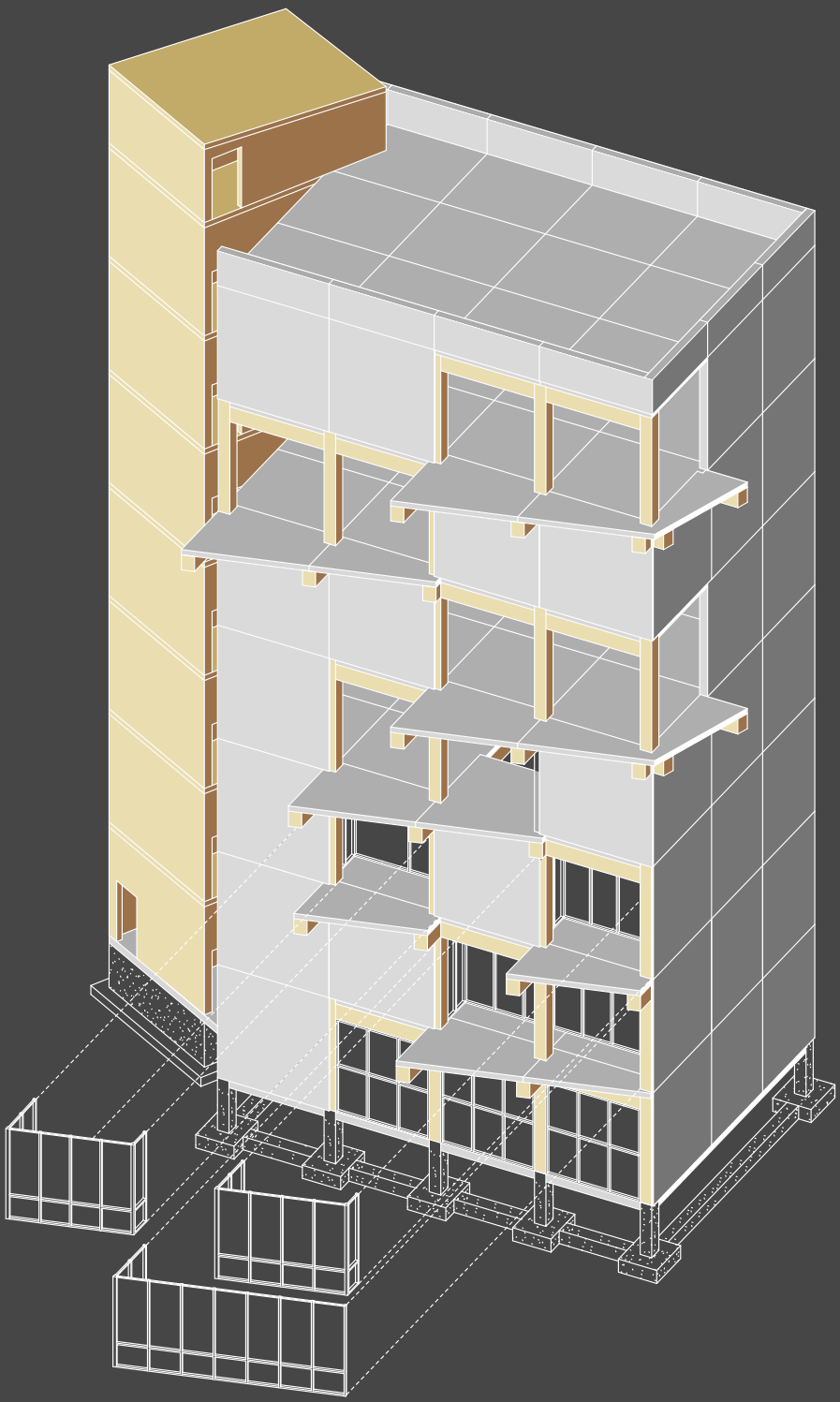
1. 40mm - Listelli di rivestimento in legno
2. 18mm - Pannello OSB
3. 60mm - Pannelli isolanti in fibra di legno
4. 18mm - Pannello OSB
5. 120mm - Pannelli isolanti in fibra di legno
6. 18mm - Pannello OSB
7. 0,5mm - Membrana impermeabilizzante
8. 13mm - Cartongesso tipo F (GKF)

U= 0,196 W/m^{2}k S=269mm

Figura 77: Schema di assemblaggio, fase 4.

Fonte: Elaborazione propria.

4. INSTALLAZIONE DELL'INVOLUCRO TRASPARENTE



Assonometrie costruttive

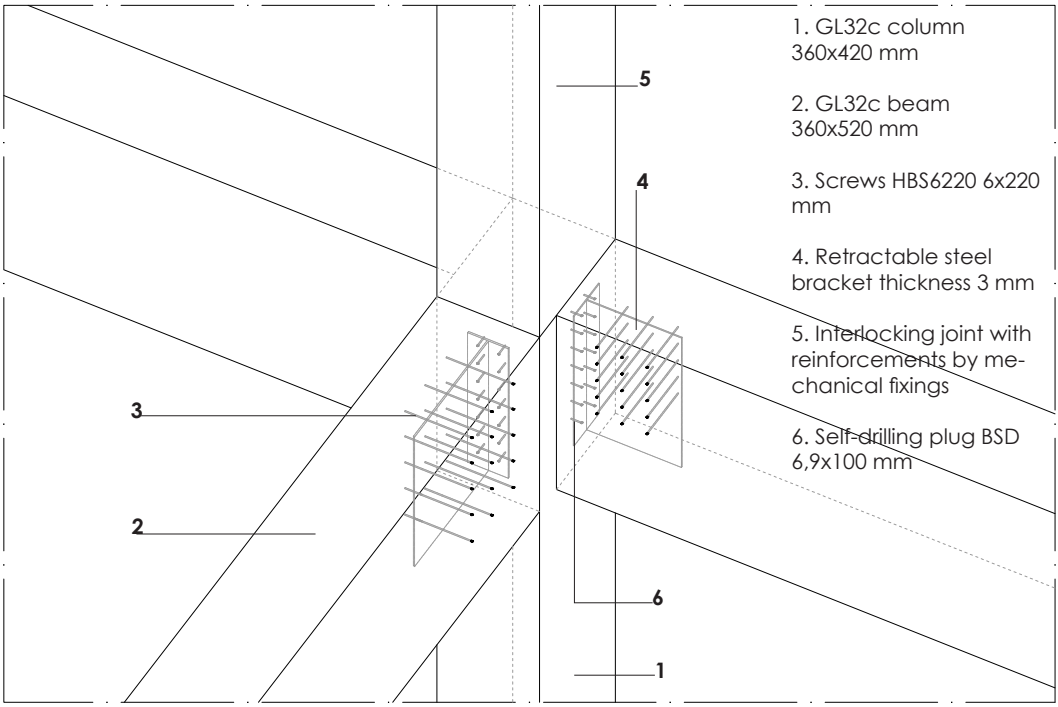
Nella immagine 78 è rappresentato uno spaccato assonometrico costruttivo, in una vista complessiva della Circualr Tower. L'intenzione di questa rappresentazione è quella di mostrare, a una scala di dettaglio limitata, la connesione tra le componenti strutturali e le stratigrafie principali che compongono la Circular Tower.
Successivamente sono stati realizzati dei dettagli specifici per alcuni nodi strutturali come quello riportato in figura 79, rappresentate i giunti tra la trave e il pilastro.

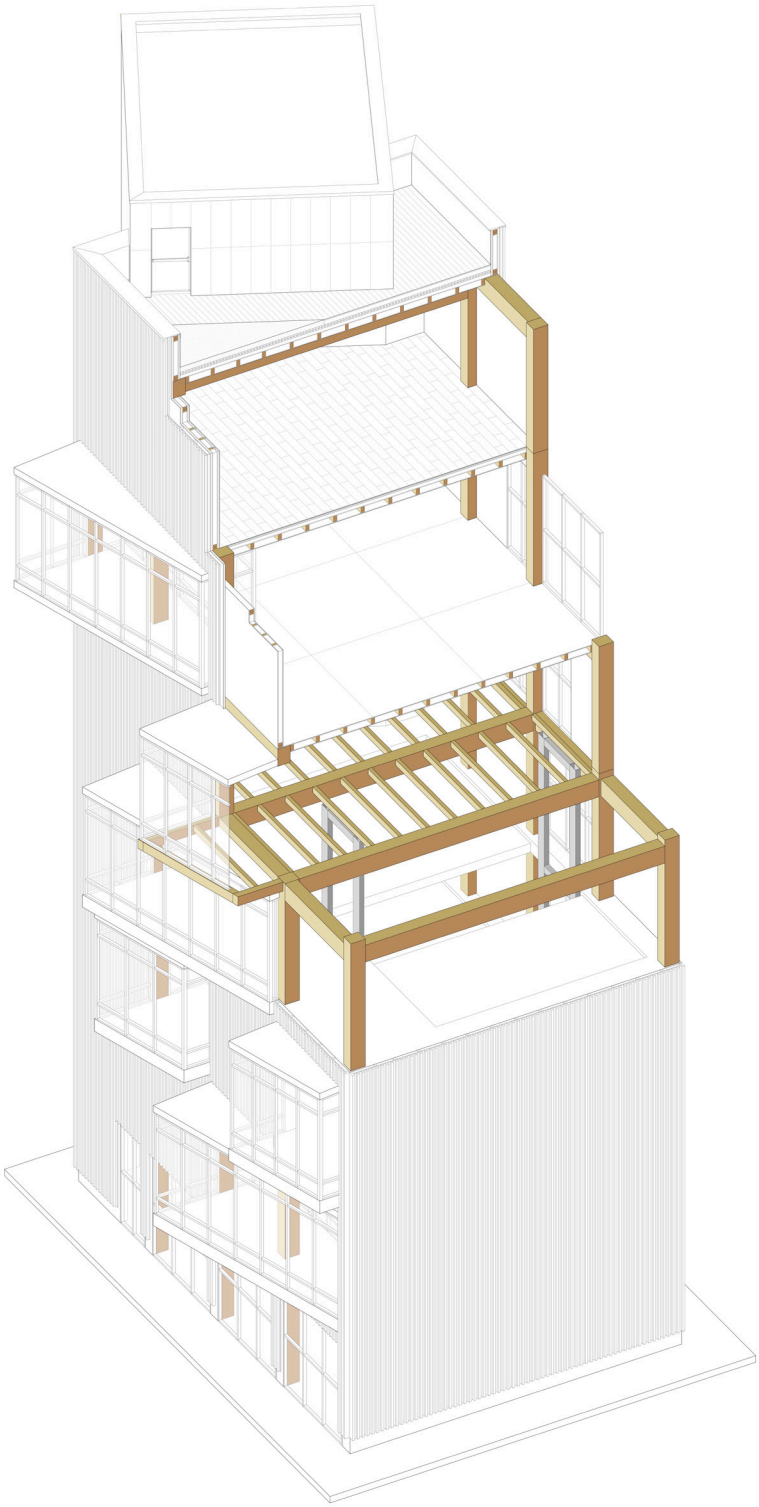
Figura 78: Assonometria costruttiva della Circular Tower.

Fonte: Elaborazione propria.

Figura 79: Dettaglio assonometrico del nodo trave-pilastro .

Fonte: Elaborazione propria.





1.4 Conclusioni

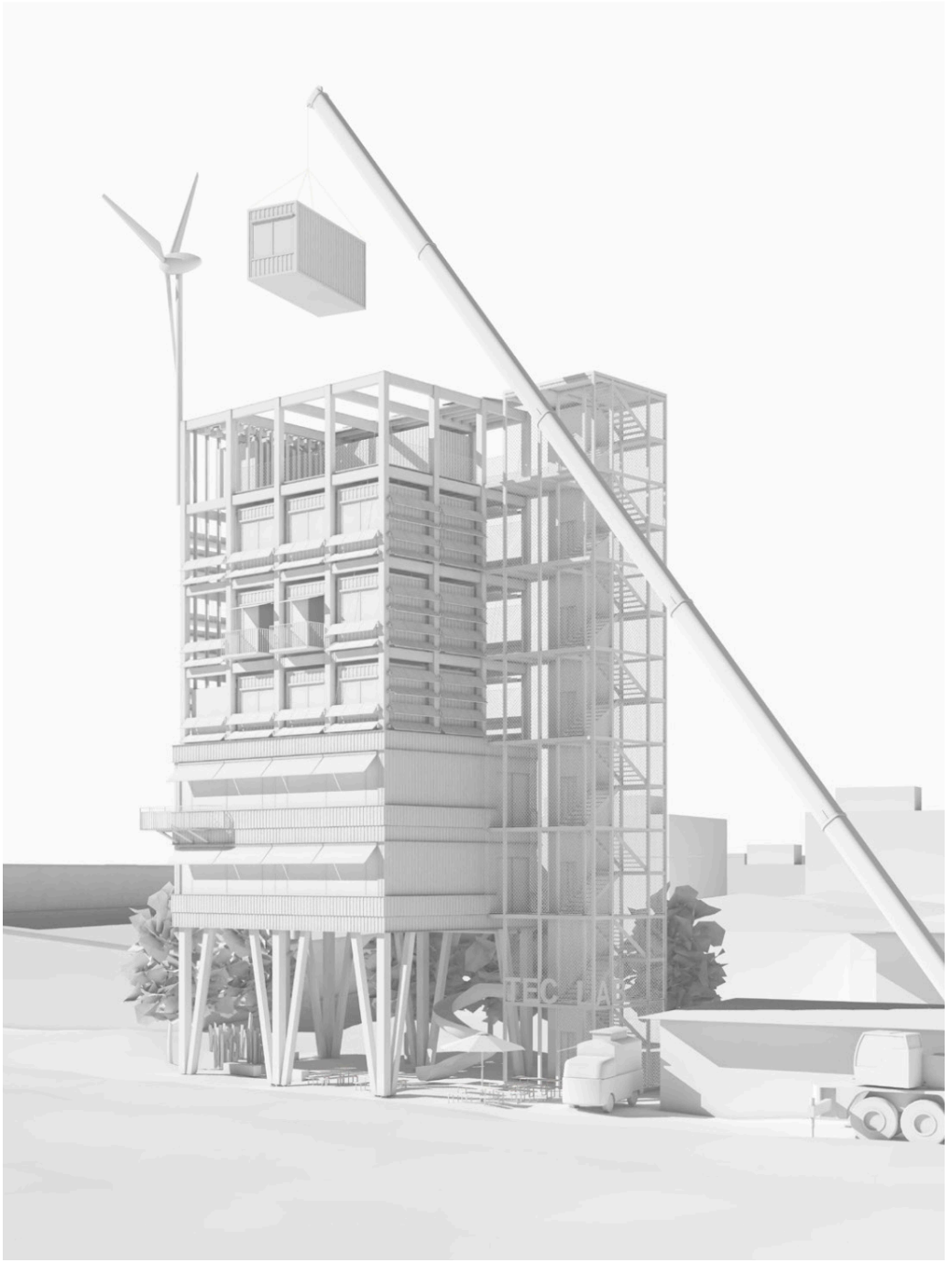
1.4.1 Esiti del concorso

Il progetto vincitore del concorso di idee “Circular Tower” è stato prodotto dagli studi Inhelder Osterwalder Architekten GmnH (architettura) e Timbatec Holzbauingenieure Schweiz (ingegneria) e prende il nome di “SETZKASTEN”. La giuria ha dichiarato che nella profondità dell’elaborazione del progetto sono chiaramente leggibili gli obiettivi sostenibili, la conoscenza della costruzione circolare, i criteri per un edificio efficiente in termini di risorse ed energia, nonché le qualità costruttive e progettuali.

La struttura portante è in legno ed è definita riutilizzabile grazie alle tipologie di connessioni. L’alluminio utilizzato in facciata è proveniente da immobili demoliti. Sono stati predisposti moduli fotovoltaici sulla facciata, collettori termici sul tetto, un sistema di accumulo energetico a gravità e una turbina eolica sul tetto.
Tutte le installazioni sono accessibili e separate dagli altri componenti. Sono stati studiati tre percorsi per il trattamento dell’acqua. La griglia libera funge da area di compensazione ecologica, per le piante rampicanti, le erbe e altri organismi viventi.

Figura 80: Vista del progetto vincitore del concorso .

Fonte: TecLab Burgdorf: Startseite. (2020). TecLab. https://teclab.swiss/.



L'attacco a terra è effettuato mediante puntoni, riducendo l'impronta al suolo.

Le caratteristiche che accomunano il vincitore del primo premio con gli altri due progetti sul podio sono il sistema di fondazioni, il riuso di materiali e componenti e la scelta di esporre gli elementi impiantistici.

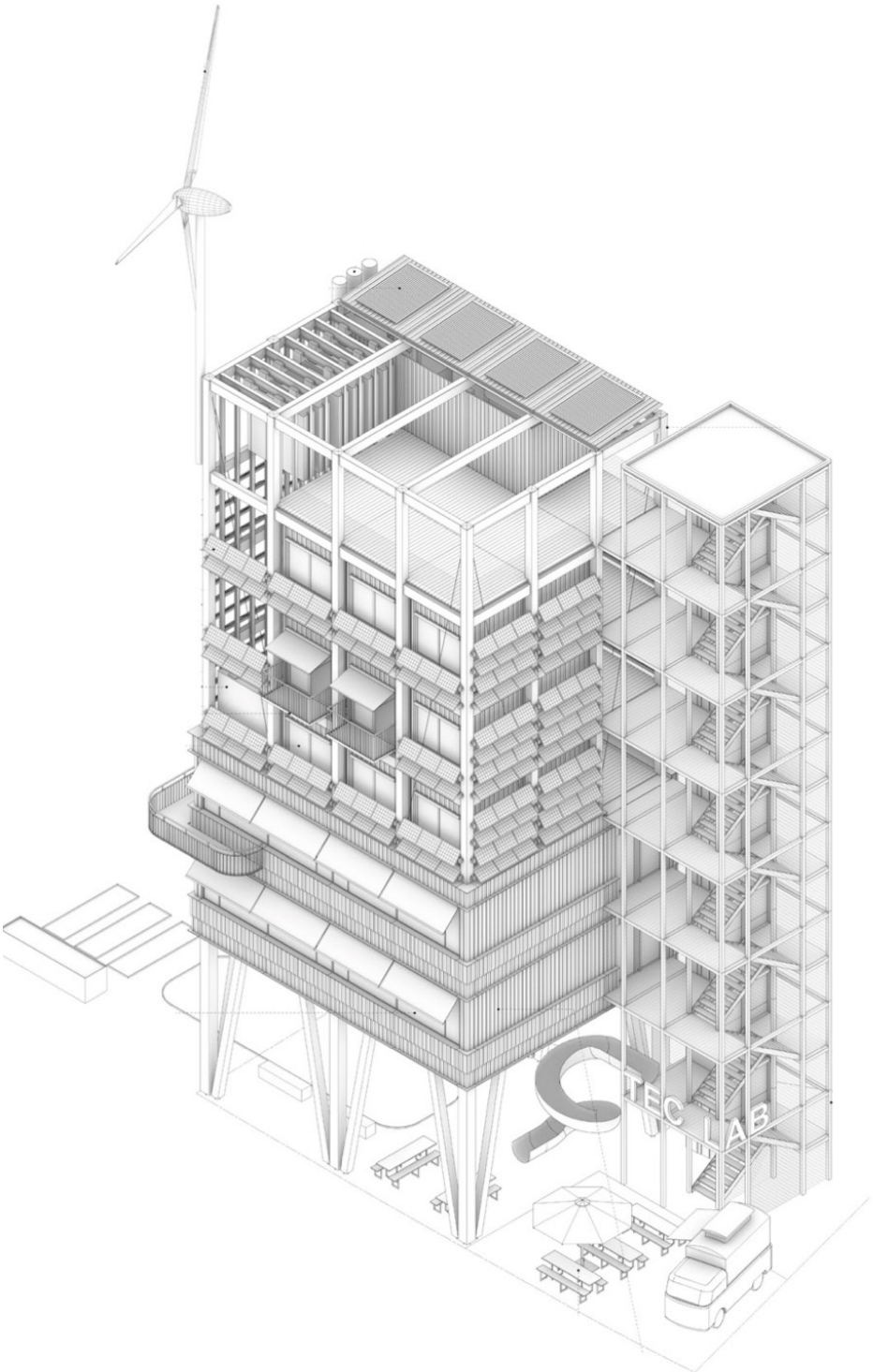
Analizzando il progetto vincitore, è stata riscontrata una carenza nella spiegazione sul movimento dei container. Vi è unicamente riportato l'utilizzo della gru, ma non si comprende come i moduli preallestiti possano essere inseriti e rimossi dall'interno dell'edificio. Antistante alla posizione dei container prevista nell'edificio, sono presenti a sud un sistema di pannelli fotovoltaici fissi e a nord la fitta vegetazione che ne impedirebbero l'inserimento. Non è possibile collocarli dall'alto poiché il solaio di copertura non presenta aperture.

A livello energetico, per quanto riguarda la climatizzazione degli ambienti, non risulta ottimale l'elevata quantità di superficie riscaldata a contatto con l'ambiente esterno. I container dovrebbero avere un proprio isolamento termico elevato, riducendone lo spazio interno.

Figura 81: Vista assonometrica del progetto vincitore del concorso .

Fonte: TecLab Burgdorf: Startseite. (2020). TecLab. https://teclab.swiss/.

In merito alla raccolta delle acque meteoriche è segnalata la presenza di un volume di accu-


TEC LAB

mulo ma non si comprende come esso venga alimentato, data l'assenza di gronde e pluviali. Inoltre, la copertura con i pannelli solari termici posti sopra il sistema di raccolta delle acque, ne impedirebbe l'accumulo diretto.

È stata evidenziata la presenza di un orto che sarà gestito dalle utenze che soggiorneranno nella Circular Tower. Non essendo riportata un'analisi delle utenze, non è certo che gli utenti pernottino per un periodo abbastanza prolungato da prendersi cura dell'orto.

Risultano interessanti le idee proposte per la produzione di energia elettrica come il sistema contrappeso, il fotovoltaico e la pala eolica. Una critica in merito a questi sistemi riguarda il posizionamento dei pannelli fotovoltaici a Est e Ovest, poiché risultano meno efficienti, e la scelta della pala eolica, data la scarsa presenza di vento nell'area.

La particolare attenzione alla progettazione degli ambienti esterni al piano terra e la grafica utilizzata sono connotazioni positive. Quest'ultima risulta però carente in termini di contesto e matericità degli elementi.

1.4.2 Considerazioni finali

Al termine del concorso e in seguito alla visione dei risultati è possibile effettuare alcune considerazioni. Il concorso di idee si è rivelato un'ottima opportunità per confrontarsi con altri progettisti sulle tematiche dell'architettura circolare e, in senso più ampio, della sostenibilità. Come critica alla metodologia progettuale impiegata si può riportare la ridotta attenzione verso la conoscenza dei membri della giuria al fine di comprendere al meglio le esigenze da loro espresse. Ad esempio, non è stato esplicitato doverosamente l'impiego di componenti e materiali di seconda mano. Essendo la Svizzera esente dagli Eurocodici, sarebbe stato opportuno progettare con maggior libertà, in merito al reimpiego dei materiali provenienti dalla decostruzione di altri edifici. Inoltre, in vista di una partecipazione a concorsi futuri, è d'obbligo una scansione più dettagliata delle parole chiave presenti nei bandi. In merito alla realizzazione degli elaborati, in seguito al confronto con i progetti vincitori si evince una carenza nella descrizione testuale delle produzioni grafiche, potendo così omettere visivamente alcuni dettagli. È importante che le committenze continuino a emettere bandi di concorso relativi a queste tematiche e che i progettisti si confrontino per incrementare la diffusione dell'architettura sostenibile e circolare.

CAPITOLO 2

Calcolo dell'impatto ambientale mediante metodologia LCA applicato al caso studio "Circular Tower"

2.1 La responsabilità del settore edile verso l'ambiente
2.2 Metodologia LCA
2.3 I software utilizzati per l'analisi LCA
2.4 Confronto dei dati e conclusioni

2.1 La responsabilità del settore edile verso l'ambiente

Il problema energetico globale si fonda sulla stretta dipendenza dall'utilizzo di fonti non rinnovabili di origine fossile, le quali hanno permesso lo sviluppo economico mondiale dalla rivoluzione industriale fino ai giorni nostri.

Il petrolio, il gas e il carbone sono le principali fonti di energia utilizzate, come è riportato nel grafico 82, dove si può inoltre osservare una ridotta percentuale dell'utilizzo di fonti d'energia prodotte da risorse rinnovabili.
Duplici sono le criticità che caratterizzano l'utilizzo di risorse non rinnovabili: in primis vi è l'esaurimento delle suddette risorse e in secondo luogo è necessario considerare l'impatto ambientale generato dal loro utilizzo. [1]

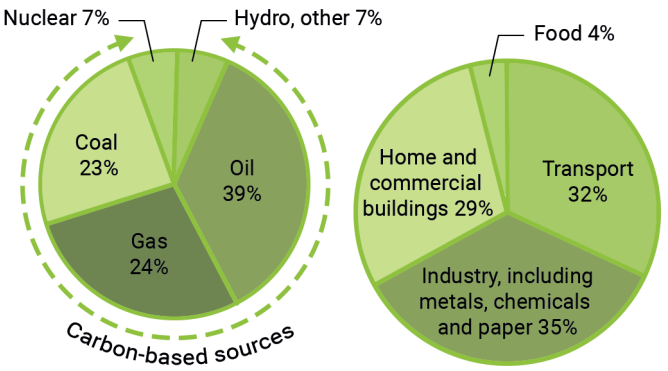


Figura 82: Le origini delle fonti energetiche e i settori in cui vengono utilizzate.

Fonte: Sartori, I., & Hestnes, A. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. Energy and Buildings, 39(3), 249–257.

[1] Silvestrini, G. (2019). Che cosa è l'energia rinnovabile.

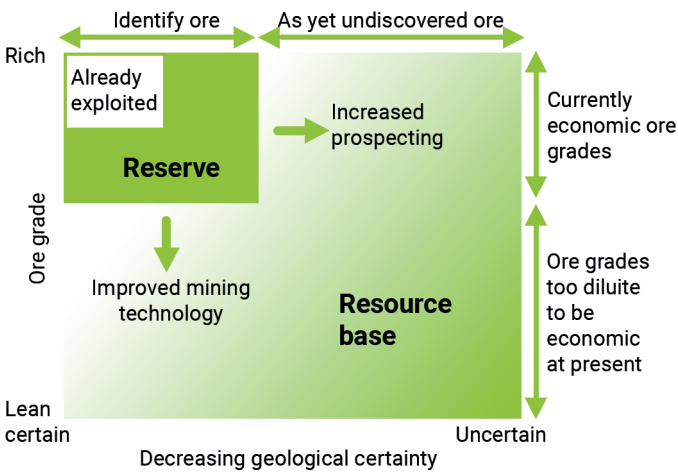


Figura 83: Le risorse e le riserve.

Fonte: Lezione frontale prof.ssa Pagliolico, 2022, Corso "Prodotti e processi dei materiali". Politecnico di Torino.

Per risorsa si intendono tutti i depositi conosciuti e sconosciuti sia estraibili che non estraibili, sono pertanto quantità ipotizzabili, ma indefinite. (Figura 83)
Queste ultime vengono classificate in risorse perenni, come il vento e il moto ondoso, in risorse rinnovabili, ovvero rigenerabili naturalmente su una scala temporale umana e integrabili dopo il loro consumo, e infine in risorse non rinnovabili come i combustibili fossili.

È possibile effettuare una seconda classificazione delle risorse in base al loro contenuto energetico. Tutti i prodotti dell'ambiente fisico tecnicamente utilizzabili per i processi di trasformazione e di sviluppo, che incidono sulle situazioni economiche, politiche, culturali di una comunità sono definibili risorse a contenuto energetico. [2]

La società moderna è dipendente dall'utilizzo di risorse energetiche al fine di svolgere i processi produttivi industriali e gestionali e ne impiega circa il 30% per il settore dei trasporti, il 5% nel settore alimentare, il 35% nel settore industriale e in una percentuale variabile dal 20% al 40% nel settore edile. [3] (Figura 82)

Altri due dati che sottolineano la rilevanza dell'impatto del settore edile sull'ambiente riguardano: la percentuale dei materiali utilizzati annualmente nell'economia mondiale, il 40% di essi viene adoperato al fine costruttivo, e la quantità di scarti prodotti dall'attività edilizia all'interno delle discariche che ammonta a circa il 40% del totale dei rifiuti. [4] (Figura 84)

[2] The Ecology of Building Materials. (2009, February 19). Routledge & CRC Press.
[3] Silvestrini, G. (2019). Che cosa è l'energia rinnovabile oggi. Edizioni Ambiente - Kyoto Club..
[4] Lovins, A. B., & Hawken, P. (2003). Capitalismo naturale. La prossima rivoluzione industriale.
[5] Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. (2011). Tabella Di Marcia Verso Un'economia Competitiva a Basse Emissioni Di Carbonio Al 2050.

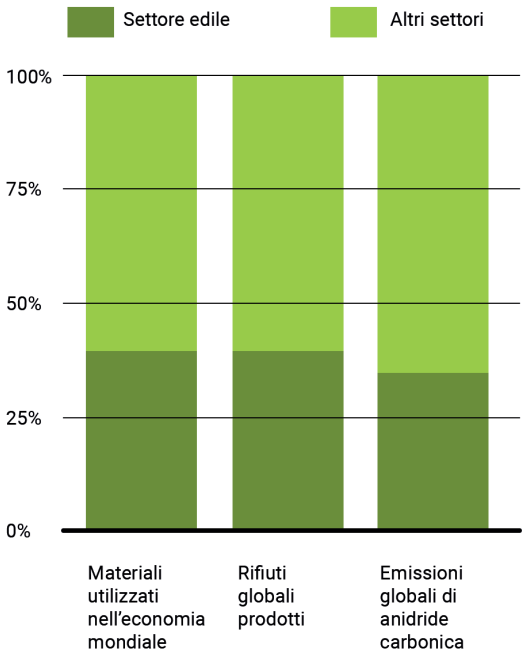


Figura 84: Utilizzo materiali, produzione rifiuti e emissioni derivanti dal settore edile.

Fonte: [2] The Ecology of Building Materials. (2009, February 19). Routledge & CRC Press.

L'edilizia contribuisce per circa il 35% delle emissioni globali di anidride carbonica, perché quest'ultima viene emessa dai processi di produzione dei materiali che compongono l'elemento edilizio, il trasporto di essi, la loro messa in opera, la loro decostruzione, il riciclaggio, la manutenzione ed inoltre la fase di vita utile dell'edificio. Addirittura l'11% delle emissioni di CO2 è causato dalla sola produzione dei materiali edili. [5]

Il mondo scientifico ammette che è in atto un surriscaldamento globale diverso da regione a regione e una relazione tra il surriscaldamento globale e le emissioni di gas serra di origine antropica, in particolare verso l'anidride carbonica.

Il Protocollo di Kyoto aveva elencato sei *gas green house gases* (GHG): l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto, l'esafloruro di zolfo, gli iper fluoro carburi e gli idro fluoro carburi. (Figura 85)

Il Protocollo di Kyoto è un trattato sul clima sottoscritto in maniera volontaria in occasione della COP 3 entrato in vigore nel 2005 grazie alla sottoscrizione della Russia.

Affinché il trattato potesse entrare in vigore, 55 nazioni lo firmarono in modo che la somma delle loro emissioni fosse pari o maggiori al 50% di quelle globali.

Gli Stati Uniti d'America non aderirono alla riduzione delle loro emissioni di gas climalteranti. L'Italia sottoscrisse un obiettivo di -6,5% dal

Figura 85: I GHG identificati dal Protocollo di Kyoto.

Fonte: IPCC Fourth Assessment Report: climate change 2007

6 Kyoto protocol GHGs

Greenhouse gas	GWP over 100 years	Typical sources
Carbon dioxide	1	Energy combustion, biochemical reactions
Methane	25	Decompositiion
Nitrous oxide	198	Fertilizers, car emission,manufacturing
Sulfure hexafluoride (SF_6)	12,800	Switch gears, substations
Perfluorocarbon (PFC)	7,390-12,200	Aluminium smelting
Hydrofluorocarbon (HFC)	124-14,800	Refrigerants, industrial gases

2008 al 2012 che non riuscì a realizzare.
La CO_2, pur avendo un potenziale clima alterante inferiore rispetto agli altri gas effetto serra, è il gas più influisce sull'effetto serra poiché è presente in quantità maggiori nell'ambiente. [6] (Figura 86)

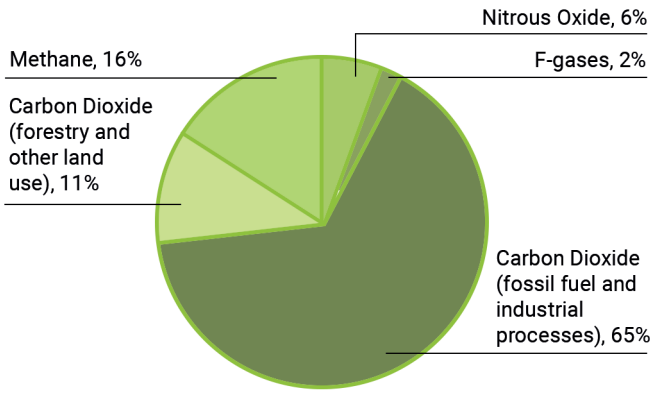


Figura 86: Quantità in percentuale dei gas killer.

Fonte: IPCC Fourth Assessment Report: climate change 2007

Con le crescenti preoccupazioni per il cambiamento climatico e le risorse limitate, il settore edile necessita di subire una decarbonizzazione, adottando misure volte a una progettazione sostenibile a livello ambientale, sociale ed economico.
È necessario un cambiamento di rotta, i professionisti nell'ambito delle costruzioni devono sviluppare e adottare soluzioni a basso impatto ambientale, diffondendo la consapevolezza e la conoscenza del settore in modo trasparente e conciso.

[6] Ashby, M. (2012). Preview View on ScienceDirect Materials and the Environment Eco-informed Material Choice.

La sostenibilità ambientale, nelle scienze ambientali ed economiche è definita come "condizione di uno sviluppo in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri".[7]

La prima conferenza ONU sull'ambiente, tenuta nel 1972, introdusse le problematiche connesse alla crescita demografica, evidenziata dal report "The limits to growth" prodotto da Kyoto Club, e quelle relative al correlato limite delle risorse disponibili. Nel 1973 viene affrontata la prima crisi climatica e i blocchi delle forniture di petrolio causati dalla Guerra del Kippur. Questi eventi sottolinearono la dipendenza dell'economia occidentale dalle fonti fossili.
Nel 1987 il concetto di sostenibilità e di sviluppo sostenibile venne descritto nella pubblicazione del Rapporto *Brundtland*. [8]

Il progresso dell'edilizia sostenibile comporta che il lavoro e l'efficienza necessari all'edificio per esistere siano ottenuti con un impatto ambientale negativo esiguo, sostenendo un potenziamento economico, sociale e culturale in ogni grado dell'espansione costruttiva umana.

[7] Sostenibilità. (2022). Retrieved November 4, 2022, from https://www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita/
[8] Scattola E. (2012). Sostenibilità e sviluppo sostenibile. Evoluzione del concetto. In MPRA - Munich Personal RePEc Archive (No. 37201). Università Ca' Foscari Venezia.

Il concetto chiave per un armonioso sviluppo sostenibile è quello di protezione: dalla degradazione, dall'uso spropositato e mal gestito delle risorse naturali, dal cambiamento climatico e, infine, la protezione del pianeta per le generazioni future.
"*La sfida urgente di proteggere la nostra casa comune comprende la preoccupazione di unire tutta la famiglia umana nella ricerca di uno sviluppo sostenibile e integrale, poiché sappiamo che le cose possono cambiare [...]. L'umanità ha ancora la capacità di collaborare per costruire la nostra casa comune*." [9]

Nel settembre 2015 le Nazioni Unite, composte da 193 paesi membri [10], hanno presentato l' "Agenda 2030" [11] per lo sviluppo sostenibile, un programma orientato verso l'obiettivo di migliorare le condizioni ambientali e sociali globali nei futuri 15 anni.
Collaborazione, Prosperità, Pace, Persone e Pianeta sono i 5 gruppi di interventi che raccolgono i 17 obbiettivi (Figura 87)e i 169 traguardi prefissati per dirigersi verso uno Sviluppo Sostenibile.

[9] Papa Francesco. (2015). Lettera enciclica sulla cura della casa comune.
[10] Nazioni Unite. (2022, March 30). ONU Italia La nuova Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. ONU Italia. https://unric.org/it/agenda-2030/
[11] Organizzazione delle Nazioni Unite. (2015). Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015.

Il nuovo paradigma è quindi già in atto, ma richiede una *governance* globale delle politiche di sostenibilità, applicando un approccio che superi i limiti delle singole discipline come la politica, l'economia, la sociologia, la biologia, la meteorologia, l'ecologia e che impieghi nuovi strumenti tra cui la *political ecology* e il *freedom oriented development*. [12]

La sostenibilità è difficilmente classificabile come forza globalizzante, perché cade tra frammentazione e integrazione. Il valore di preservare l'ambiente e mantenere la sua vitalità è largamente condiviso, ma ha portato ad una frammentazione tra e all'interno delle comunità, dei Paesi e dei Sistemi Internazionali, essendo le politiche intraprese per attuare gli impegni sull'ambiente altamente controverse. [13]

[12] Lezione frontale prof.ssa Pagliolico, 2022, Corso "Prodotti e processi dei materiali". Politecnico di Torino.
[13] Rosenau, J. N. (2003, December 2). Globalization and Governance: Bleak Prospects for Sustainability Internationale Politik und Gesellschaft.

Figura 87: I 17 sustainable goals suddivisi per categoria.

Fonte: https://ec.europa.eu/info/strategy/international-strategies/sustainable-development-goals/eu-holistic-approach-sustainable-development_en

COP

COP è l'acronimo di *Conference of Parties*, la riunione annuale dei Paesi che hanno ratificato la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC).
La Convenzione è un trattato ambientale internazionale che fu firmato durante la Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite, informalmente conosciuta come Summit della Terra, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992.
Il trattato punta alla riduzione delle emissioni dei gas serra, alla base dell'ipotesi di riscaldamento globale. Il trattato non poneva limiti obbligatori per le emissioni di gas serra ma prevedeva la stipula di protocolli che avrebbero posto i limiti obbligatori di emissioni: il principale di questi è il protocollo di Kyōto. [14]
Nel quadro dell'Accordo di Parigi del 2015 ciascun Paese si è impegnato a creare un piano nazionale indicante la misura della riduzione delle proprie emissioni, detto Nationally Determined Contribution (NDC) o "contributo determinato a livello nazionale"

[14] COP. (n.d.). Dipartimento per Le Politiche Europee. Retrieved November 4, 2022, from https://www.politicheeuropee.gov.it/it/comunicazione/euroacronimi/cop-1/

Obiettivi delle Conference Of Parties

1. Azzerare le emissioni nette a livello globale entro il 2050 e puntare a limitare l'aumento delle temperature a 1,5°C accelerando il processo di fuoriuscita dal carbone, riducendo la deforestazione, accelerando la transizione verso i veicoli elettrici e incoraggiando gli investimenti nelle fonti rinnovabili di energia.

2. Adattarsi per la salvaguardia delle comunità e degli habitat naturali proteggendo e ripristinando gli ecosistemi, costruendo difese, sistemi di allerta, infrastrutture e agricolture più resilienti.

3. Mobilitare i finanziamenti da parte dei paesi sviluppati.

4. Collaborare finalizzando il "Libro delle Regole" di Parigi e accelerando le attività volte ad affrontare la crisi climatica attraverso il rafforzamento della collaborazione tra i governi, le imprese e la società civile. [15]

[15] GLI OBIETTIVI DELLA COP26. (2021, October 26). UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021. https://ukcop26.org/it/gli-obiettivi-della-cop26/

Secondo gli obiettivi delineati nelle COP, ogni nazione deve intraprendere misure per la riduzione delle emissioni e il conseguente limite dell'aumento delle temperature.
Come descritto precedentemente, il settore edile produce emissioni in una quota parte non trascurabile, le quali derivano dai processi di estrazione delle materie prime, dalla produzione dei materiali, dal trasporto, dalla messa in opera, dalla manutenzione, dalla fase d'uso connessa soprattutto alla climatizzazione, dalla demolizione e dallo smaltimento dei rifiuti.

Organizzazioni come il London Energy Transformation Initiative (LETI) [16] e il World Green Building Council (W-GBC) [17] propongono, per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni del settore edile, la diffusione delle conoscenze e delle competenze necessarie alla realizzazione di edifici a zero emissioni. Le suddette emissioni devono più che dimezzarsi entro il 2030 per giungere a uno stock edilizio *Net Zero Carbon* entro il 2050.
Le emissioni devono essere drasticamente ridotte durante l'intero ciclo di vita degli edifici, comprendendo tutte le emissioni operative e incorporate.

Le tipologie di carbonio sono: l'*Embodied Carbon (EC)* e l'*Operational Carbon (OC)*. La prima

tipologia si riferisce alle emissioni generate dal processo completo di estrazione, produzione, trasporto, installazione, manutenzione e smaltimento dei materiali da costruzione ed incide per circa l'11% della CO_2 globale. [18]
L'OC invece, rappresenta l'anidride carbonica emessa durante la fase d'uso dell'edificio, ad esempio prodotta per effettuare la climatizzazione.
L'EC viene riconosciuto come uno dei principali fattori d'impatto climatico, infatti molti paesi ne stanno fissando i limiti per la sua riduzione. [19]
Nella strategia Renovation Wave, la Commissione europea ha annunciato la sua intenzione di affrontare "il pensiero del ciclo di vita e la circolarità" [20]; è importante che l'intenzione sia seguita da un'azione decisa e integrata nelle proposte normative.

[16] Embodied Carbon Primer | LETI. (2022). Leti. https://www.leti.uk/ecp
[17] Advancing Net Zero. (2022). World Green Building Council. https://worldgbc.org/
[18] Circle Economy. (2019). The Circularity Gap Report: Closing the Circularity Gap in a 9% World. Circle Economy.
[19] © 2021 One Click LCA Ltd All rights reserved. (2021). Decarbonizing construction Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon. https://www.oneclicklca.com/decarbonizing-construction-report/
[20] Toth Z. & Volt J. (2021). Whole-Life Carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings. In BPIE.

Questo rapporto di sintesi introduce i concetti di base e le questioni chiave riferite all'integrazione delle considerazioni relative al carbonio durante l'intero ciclo di vita nelle politiche edilizie. Vuole essere un punto di partenza per i responsabili politici e le parti interessate del settore edile per impegnarsi sulle lacune politiche e sulle potenziali soluzioni di mitigazione per gli approcci del ciclo di vita del carbonio per l'edilizia e gli edifici.

La metodologia scientifica per quantificare gli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto o un manufatto è l'LCA (*Life Cycle Assessment*) la quale converte le emissioni in potenziali di impatto ambientale.

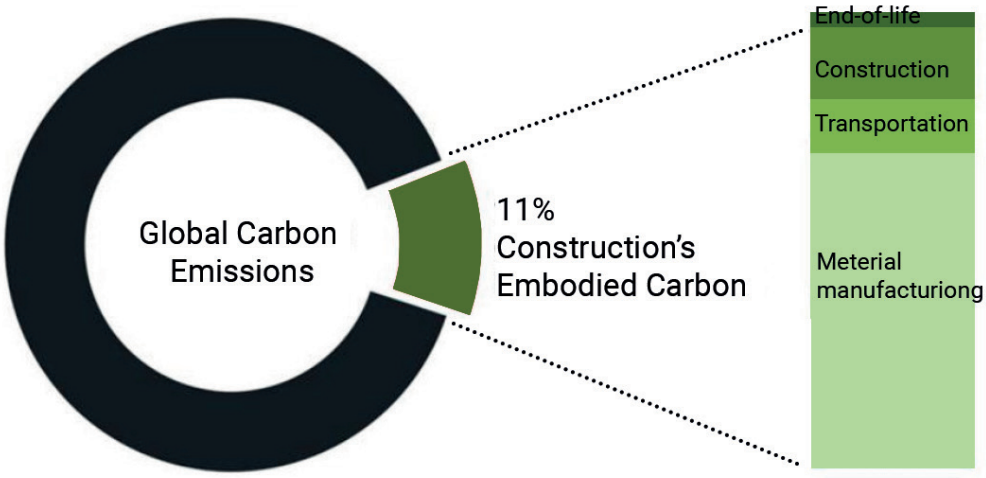


Figura 88: L'Embodied Carbon derivante dal settore delle costruzioni.

Fonte: 2021 One Click LCA

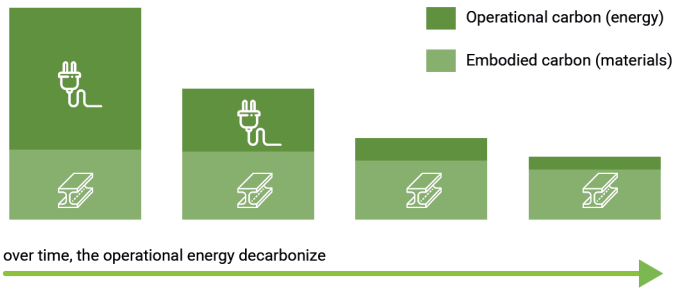


Figura 89: La decarbonizzazione dell'OP.

Fonte: 2021 One Click LCA

Gli impatti, espressi in quantità di una sostanza che può causare danni all'ambiente come le emissioni di gas serra, sono noti come indicatori intermedi. Non rappresentano il danno effettivo, noto come indicatore di *endpoint*, ad esempio l'innalzamento del livello del mare.
Di seguito sono riportati gli indicatori intermedi più utilizzati per la valutazione dell'impatto ambientale e dell'utilizzo delle risorse (Figura 90). [21] [22]

[21] © 2021 One Click LCA Ltd All rights reserved. (2021). Decarbonizing construction Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon. https://www.oneclicklca.com/decarbonizing-construction-report/
[22] One Click LCA Ltd. (2021). Life Cycle Assessment for building Perché è importante. https://oneclicklca.drift.click/building-lca-ebook

Environmental and resource use indicators		Description
Global Warming Potential (GWP) Unit $kgCO_2eq$		Climate change or global warming potential due to emission of greenhouse gases.
Acidification Potential (AP) Unit $kgSO_2eq$		Acidifying emissions that result in a lower pH-value of water and soil, decreasing the nutrient availabily and intake of plants.
Eutrophical Potential (EP) Unit $kgCO_2eq$		Nutrient emissions (nitrogen & phosphorus) that increase the flow of nutrients to ecosystems, causing algae growth in waters.
Ozone Depletion Potential (ODP) Unit $kgCFC_{11}eq$		Describes damage caused to the ozone Layer in the stratosphere (from refrigerants). Increase harmful UV-radiation.
Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) Unit kgC_2H_4eq		Describes the effect of substances in the atmosphere to create photochemical smog.
Abiotic Depletion Potential for fossil Resources (ADPf) Unit MJ		Resource use indicator which describes the reduction of the global amount of non-renewable raw materials and is determined for each extraction of minerals and fossil fuels based on the remaining reserves and rate of extraction.

Tra le diverse categorie di impatto ambientale vi è la valutazione del potenziale di riscaldamento globale (GWP) il quale esprime le emissioni antropiche che contribuiscono all'effetto serra e al surriscaldamento globale e determina la CO_2 incorporata, anche chiamata impronta di carbonio. Questo indicatore, normalizza in peso di anidride carbonica il contributo potenziale che un gas serra arreca al riscaldamento globale, valutato nell'arco di 100 anni.

Figura 90: Indicatori ambientali e dell'uso delle risorse.

Fonte: Elaborazione propria basata su "One Click LCA Ltd. (2021). Life Cycle Assessment for building Perché è importante".

È possibile agire sulla riduzione dell'EC effettuando scelte consapevoli fin dai processi di progettazione che includono anche la scelta dei prodotti da costruzione, i quali devono essere confrontati in base alle loro prestazioni ambientali associati alla produzione e all'utilizzo di prodotti alternativi [23] e non solo in base al prezzo.

L'utilizzo del legno si sta nuovamente diffondendo grazie alla sua capacità di sequestrare e stoccare carbonio mitigandone le quantità\ effetti nell'atmosfera. Citando Werner [24] "*un maggiore utilizzo dei prodotti di legno e un adeguata gestire delle foreste possono aiutare a mitigare il cambiamento climatico*" .

[23] Lippke, B. R., Wilson, J., Perez-Garcia, J., & Bowyer, J. (2004). CORRIM: Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials. Forest Products Journal, 4(56).
[24] Werner, F., Hofer, P., Taverna, R., & Thürig, E. (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science and Technology, 13, 72–85.

2.2 Metodologia LCA

2.2.1 Life Cycle Thinking

Il "*Life Cycle Thinking*", che in italiano si potrebbe tradurre con l'espressione "concetto del ciclo di vita", è una filosofia di pensiero che ha origine dal concetto di sviluppo sostenibile in cui le sfere di sviluppo economico, sociale e ambientale devono integrarsi. [25]
Il *Life Cycle Thinking*, applicato al settore delle costruzioni, considera gli elementi che compongono un edificio come l'insieme delle operazioni, dei flussi in input e output di materiali e forme di energia associate a tutti gli *step* del suo ciclo vita [26].
È un approccio che va oltre la semplice analisi del processo produttivo di un prodotto e trova la sua applicazione attraverso strumenti come per esempio il *Life Cycle Assessment*, il *Life Cycle Costing* e il *Social Life Cycle Assesment* per permettere ai progettisti, ai consumatori e ai produttori di operare scelte attente nei confronti degli aspetti ambientali. [27] [28]

[25]UN Environment Document Repository Home. (2022). https://wedocs.unep.org/
[26] GreenClimateCities. (2022). ICLEI's Climate Neutrality Framework. ICLEI.

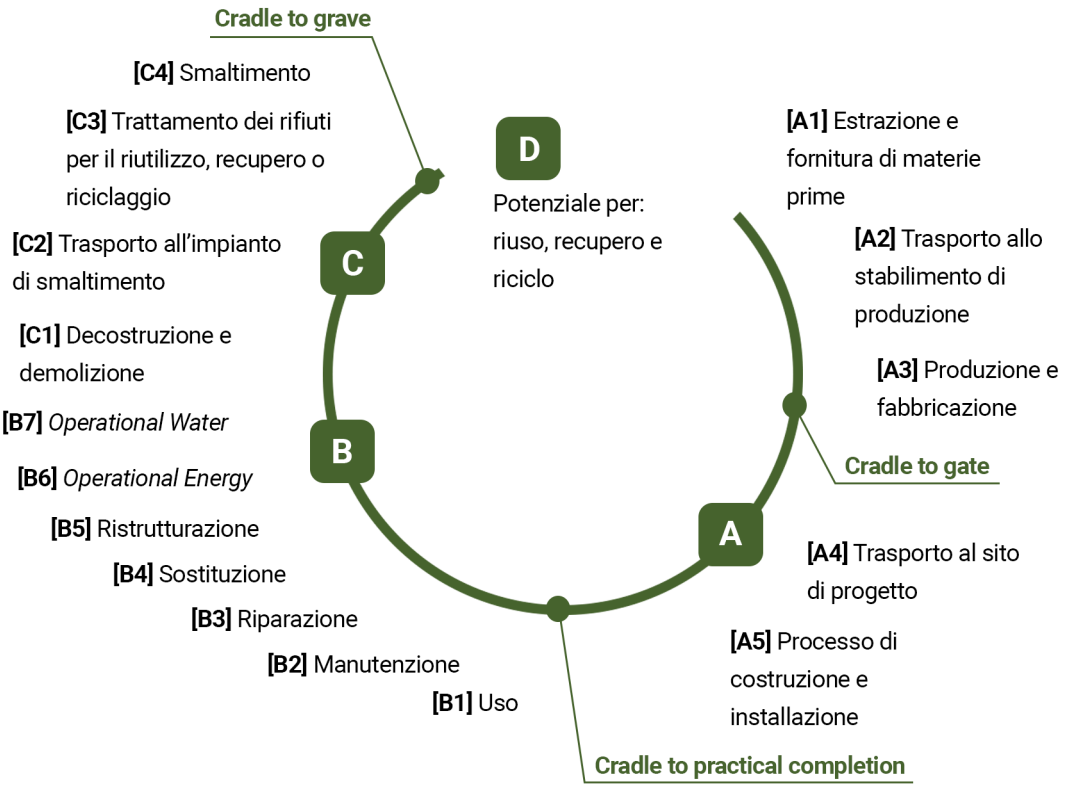


Figura 91: Diagramma della valutazione del ciclo vita LCA.

Fonte: Elaborazione propria basata su "LETI group. (2022). Embodied Carbon Primer. In LETI."

[27] Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2010). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. Environmental Science &Amp; Technology, 45(1), 90–96.
[28] Jensen, A. A., Hoffman, L., Moller, B., Schmidt, A., Cristiansen, K., Berendsen, S., & Elkington, J. (2001). Life-cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources. A report prepared for and published by the European Environment Agency (EEA). Environmental Issues Series, 6.

2.2.2 Life Cycle Assessment

La valutazione del ciclo di vita (LCA) è una metodologia consolidata utilizzata in tutto il mondo per valutare un prodotto o un componente per le sue prestazioni ambientali.
L'LCA può considerare tutti gli input e gli output effettuati in un processo di produzione dall'estrazione allo smaltimento (cioè dalla culla alla tomba). [29]
Prima di assumere la denominazione di *Life Cycle Assessment* la metodologia era già conosciuta con altri termini ad esempio *Life Cycle Analysis*, *Crandle to Grave Analysis*, *Eco Balance Energy* e *Enviromental Analysis*.

Inizialmente lo studio veniva svolto sul prodotto finale non dando peso ai processi produttivi dei singoli componenti e paragonando tra loro dei materiali con funzioni e prestazioni diverse. L'innovazione dell'approccio LCA è data dal soddisfacimento delle funzioni proprie di ogni settore produttivo considerando un prodotto come un insieme di operazioni, rappresentabili da flussi in input ed output di materiali e forme

[29] Bergman, R. D. (2012). The effect on climate change impacts for building products when including the timing of greenhouse gas emissions [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Wisconsin-Madison.

di energia associate a tutte le fasi del suo ciclo vita. [30]

Questa metodologia è fondata su criteri oggettivi che consentono di individuare e valutare i potenziali impatti ambientali ed i carichi energetici di un prodotto o di un processo produttivo, attraverso lo studio dei flussi in entrata (materiali, risorse ed energia) ed in uscita (rifiuti ed immissioni nell'ambiente) lungo tutto il ciclo vita del fabbricato. Infatti, con l'analisi cosiddetta "dalla culla alla tomba" il sistema produttivo viene determinato in riferimento all'intero ciclo vita dell'edificio. La valutazione include quindi: l'estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale. [31]

Non esistono processi produttivi e quindi anche prodotti a costo energetico ed ambientale nullo.

Questo tipo di analisi serve alla comprensione del funzionamento di tali processi per poi essere in grado di proporre azioni di miglioramento e compensazione, permettendo così la realiz-

[30] Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). Analisi del ciclo di vita LCA. Edizioni Ambiente.

[31] Consoli, F., Allen, D., Boustead, J., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Seguin, J., & Vigon, B. (n.d.). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice." Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

zazione di studi completi del prodotto considerando tutti i processi connessi con il suo ciclo vita. [32]

2.2.3 Origini dell'LCA

Negli anni '70 l'analisi del ciclo vita era una pratica in fase embrionale in cui venivano sperimentate diverse metodologie, mentre nel decennio successivo si iniziò a comprenderne le potenzialità come mezzo di supporto nella produzione. Trova così la sua denominazione di *Life Cycle Assestment*. [33]
Negli anni '90, organizzazioni come SETAC (*Society of Enviromental Toxicology and Chemistry*) [34] hanno lavorato al consolidamento e standardizzazione dei metodi di ciclo vita, pubblicando i primi manuali e i primi dispositivi per il calcolo con banche dati associate.

[32] Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). Analisi del ciclo di vita LCA. Edizioni Ambiente.
[33] Bergman, R. D. (2012). The effect on climate change impacts for building products when including the timing of greenhouse gas emissions [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Wisconsin-Madison.
[34] Consoli, F., Allen, D., Boustead, J., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Seguin, J., & Vigon, B. (n.d.). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice." Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

La SETAC ha compreso che la raccolta di dati è un fattore vitale nell'area LCA infatti ha lavorato sulla disponibilità e qualità dei dati studiando questioni chiave relative ad esse.

Il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e SETAC hanno lanciato il UNEP-SETAC Life Cycle Initiative per stabilire le migliori pratiche su ricerca sul ciclo di vita [35]. Inoltre, CORRIM (*Consortium for Research on Renewable Industrial Materials*) ha sviluppato nel 2001 linee guida di ricerca sulle foreste e sui prodotti in legno statunitensi.
Si arriva così ai giorni nostri, dove l'attenzione è passata dalle istituzioni per arrivare all'interesse comune raccogliendo un adesione e un interesse sempre più ampio e comune alle problematiche ambientali.

La SETAC, prima società scientifica che intuì la necessità di una standardizzazione della metodologia LCA, nel 1993 ne propose la seguente definizione: "procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuata attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali

[35] Curran, M. A. (2006). Report on Activity of Task Force 1: Data Registry - Global Life Cycle Inventory Data Resources. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11(4), 284–289.

usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale". [36]

[36] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). (1991). A Techical Framework for Life Cycle Assessment. SETAC Foundation for Environmental Education.

Principi fondamentali di uno studio LCA

I principi i principi fondamentali di uno studio LCA sono i seguenti (ISO 14040-44:2006a):

- **Prospettiva del ciclo di vita**: si considera l'Intero ciclo di vita del prodotto nei confini definiti del sistema;
- **Attenzione focalizzata all'ambiente**: uno studio LCA non si occupa generalmente degli aspetti e degli impatti sociali ed economici;
- **Approccio relativo e unità funzionale**: l'LCA è un proprio approccio relativo strutturato attorno ad un parametro che va a definire quanto studiato;
- **Approccio iterativo**: l'LCA è una tecnica iterativa in quanto le singole fasi utilizzano i risultati di tutte le altre fasi;
- **Trasparenza**: al fine di garantire una corretta interpretazione dei risultati;
- **Priorità dell'approccio scientifico**: le decisioni prese nel studio si devono basare principalmente sulle scienze naturali, se ciò non risulta possibile si può fare riferimento a convenzioni internazionali. [37]

[37] Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. (2007). ISO/TC 207/SC 5 Life Cycle Assessment, 2. https://www.iso.org/standard/37456.html

2.2.5 Le fasi dell'LCA

Le normative ISO 14040-44 regolamentano le quattro fasi che caratterizzano l'analisi LCA.

Fase 1

La "definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione" è il punto focale della prima fase, in cui è necessario tracciare i confini del sistema preso in analisi e definire l'obiettivo di studio descrivendone l'applicazione e le motivazioni che hanno indotto a effettuare l'analisi.
Le finalità che portano alla realizzazione di un'analisi LCA possono essere connesse alle tematiche di ricerca e sviluppo, al di *green marketing* per permettere alle imprese di descrivere il loro l'impegno nell'attuare soluzioni sostenibili e all'*eco-design*.

Per connettere le emissioni del prodotto-componente edilizio al prodotto stesso è necessario fare riferimento ad un'unità funzionale, la quale si può ricavare dal flusso di riferimento. "Tale flusso di riferimento è in pratica la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale scelta". [38]

[38] Baldo G.L., Marino, M., Rossi S. Analisi del ciclo vita LCA: gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi, Edizioni Ambiente, Milano 2008.

Per consentire lo svolgimento dell'LCA senza dover modellare la totalità del sistema del prodotto è possibile definire le *cut-off rules* che permettono di omettere attività e processi non rilevanti in termini di quantità di impatto ambientale.

Fondamentale risulta la definizione dei confini del sistema (Figura 92) al fine di determinare il campo di studio in base a criteri geografici, tecnologici e temporali. Tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto comportano emissioni di gas serra climalteranti e generalmente viene esclusa la fase d'uso.

Figura 92: I confini del sistema.

Fonte: Elaborazione propria.

Cradle-to-gate emissions:
Emissioni a partire dalla fase di estrazione delle materie prime fino all'uscita dei materiali da costruzione dalla fabbrica. In questo ciclo di vita sono incluse le fasi di estrazione della materia prima, trasporto, processo di trasformazione e manifattura.

Cradle-to-site emissions:
Cradle-to-gate emissions + il trasporto in cantiere o il sito di installazione.

Cradle-to-end of construction emissions:
Cradle-to-site + costruzione e assemblaggio in cantiere.

Cradle-to-grave emissions:
Cradle-to-end of construction + manutenzione, ristrutturazione, demolizione, trattamento dei rifiuti da C&D, dismissione ('grave').

Cradle-to-cradle emissions:
Cradle-to-end + fase di riciclo o riuso.

Fase 2

La *Life Cycle Inventory,* detta anche "analisi dell'inventario", è la seconda fase della metodologia LCA e si basa sulla definizione di un modello analogico del sistema produttivo dell'oggetto di analisi in cui è necessario individuare tutti i dati di input e di output, organizzandoli in un diagramma di flusso. I metodi di calcolo quantificano i flussi del sistema, rappresentando come flussi di entrata le materie prime, l'acqua e l'energia e come flussi in uscita, oltre al prodotto in analisi, i rifiuti e le emissioni generate. [39]

Nel modello analogico della realtà viene riportato tutto il ciclo vita di un prodotto, dalle attività estrattive delle materie prime, alla produzione, al trasporto in fabbrica, alla costruzione e infine alla sua dismissione.

Ogni processo e unità di processo devono essere dettagliatamente descritte riportando i flussi ad esso appartenenti, facendo riferimento sempre alla stessa unità funzionale.
È fondamentale descrivere le unità di misura utilizzate, le tecniche di raccolta dei dati e i metodi di calcolo per una comprensione coerente ed uniforme del sistema oggetto di analisi.

Ogni materiale possiede una propria prestazione ambientale, con differenze significative da produttore a produttore, ed è descritta nella scheda EPD (*Enviromental Product Declaration*). Perciò durante le fasi iniziali di progetto è più consono utilizzare dati generici dei materiali che riportano le prestazioni ambientali medie per tutti i prodotti all'interno della medesima categoria, evitando così di assumere scelte progettuali basate sulle caratteristiche specifiche di un singolo prodotto che potrebbero non essere rappresentative.

I dati EPD possono essere utilizzati quando si è pronti per acquistare il materiale da un fornitore specifico.

Le EPD sono etichette ambientali ottenute mediante la valutazione LCA del prodotto, organizzate tramite le PC (*product categories*), volute dal produttore stesso e certificate tramite un controllo di verifica di un ente terzo. [40]

Le EPD per i prodotti forniscono un modo per comunicare i risultati dell'LCA alle aziende e ai consumatori in un formato standardizzato .

[39] Lavagna M., Life Cycle Impact Assessment in edilizia progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale, Hoepli, Milano 2008)

[40] Bergman, R. D. (n.d.). The effect on climate change impacts for building products when including the timing of greenhouse gas emissions [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Wisconsin-Madison.

Possedere l'elenco delle EPD dei materiali che compongono il prodotto finito facilita e velocizza l'operazione di valutazione ambientale complessiva.

Fase 3

La terza fase è definita "valutazione dell'impatto del ciclo di vita" (*Life Cycle Impact Assessment*) e consiste nella valutazione effettiva dell'impatto ambientale dei prodotti, associando i risultati ottenuti nella fase precedente di *Life Cycle Inventory* alle categorie di impatto che si intendono analizzare.
Risulta quindi necessario definire le categorie di impatto e gli indicatori di categoria, assegnare i risultati della fase LCI alle categorie di impatto ed infine utilizzare i fattori di caratterizzazione al fine di aggregare i risultati ottenuti nella fase di inventario all'interno della categoria di impatto. Un valore che risulta positivo all'interno di una categoria non esclude che esso non possa essere negativo in un'altra. Sarebbe ottimale calcolare i valori ottenuti di tutte le categorie, riportate nella figura 90, per poter ottenere una visione completa ed esprimere valutazioni più chiare ed oggettive.
Ad ogni categoria è associato un parametro rappresentativo equivalente secondo cui normalizzare i risultati ottenuti. [41]

Fase 4

L'ultima fase della metodologia LCA, definita "interpretazione dei risultati", vede il raggruppamento dei risultati degli impatti ambientali al fine di delineare proposte ed interventi migliorativi nel processo produttivo.
È necessario procedere con l'individuazione dei fattori più impattanti rispetto all'obiettivo e al campo di applicazione, valutarli per certificarne la completezza e la coerenza ed infine produrre delle conclusioni e delle raccomandazioni.

Nella valutazione degli edifici sono necessari dei termini di confronto per comprendere l'entità dell'impatto distribuito tra le fasi del ciclo vita, i materiali e gli elementi strutturali.

[41] Pollo, R. (2014). Un approccio consapevole alla progettazione : dall' LCA al BIM. [Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile]. Politecnico di Torino.

2.2.4 LCA nell'edilizia

L'analisi di ciclo di vita è regolamentata dalle norme UNI EN ISO 14040, ed è definita come "tecnica oggettiva di valutazione ambientale per la quantificazione degli impatti ambientali di un prodotto o di un processo durante tutte le fasi del ciclo di vita, attraverso la misura sistematica di tutti gli scambi fisici da e per il sistema ambiente".

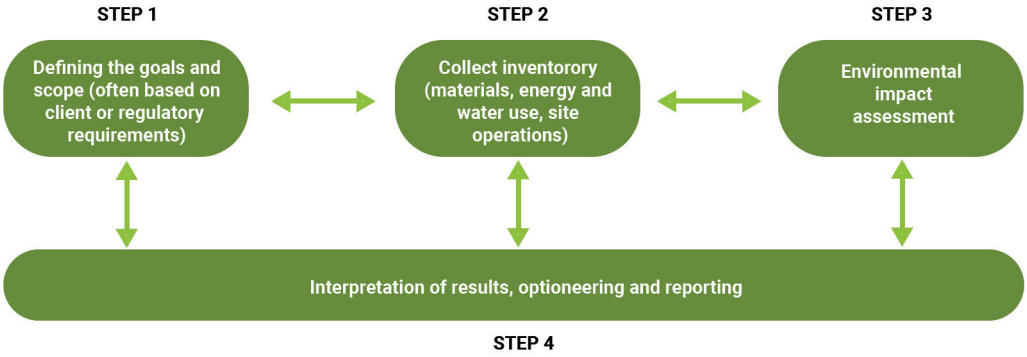
Figura 93: Le fasi dell'LCA in edilizia.

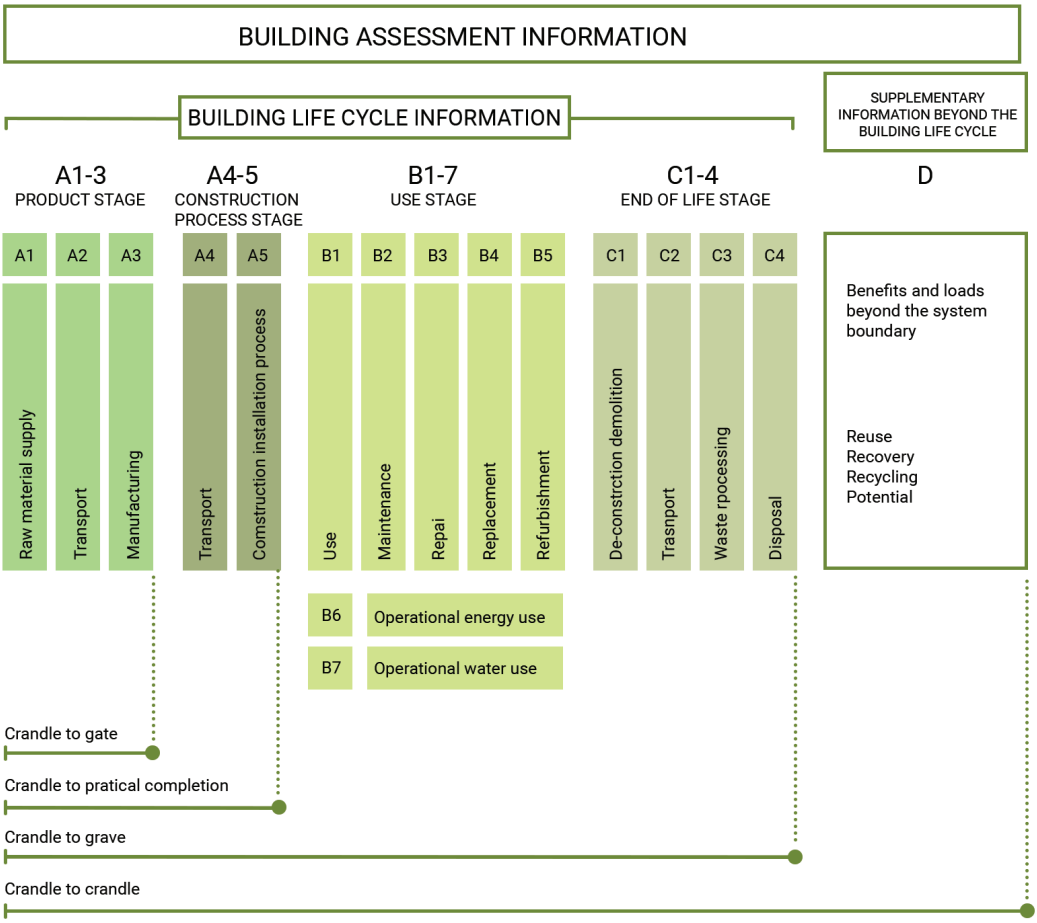
Fonte: 2021 One Click LCA

L'analisi LCA applicata al settore specifico delle costruzioni è regolamentata dalle normative UNI EN 15978:2011 (Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo), CEN 350 (Sustainability of Construction Works) e ISO/TC 59 (Buildings and civil engineering works), utili a fornire metodi di calcolo e principi guida per la selezione dei materiali, la scelta delle tecniche costruttive, l'individuazione delle soluzioni impiantistiche e la gestione del fine vita dell'edificio.
L'analisi LCA degli edifici rispetta la scansione nelle quattro fasi proposta dalla normativa ISO 14040 (Figura 93).
L'ambito del ciclo di vita è specificato in base alle designazioni dei moduli standardizzate (A1, A2, A3... fino a D) come definito in EN 15804 e ISO 21930 (Figura 94).

Figura 94: Le informazioni sulla valutazione dell'edificio suddivise nei moduli standard.

Fonte: 2021 One Click LCA


STEP 1
Defining the goals and scope (often based on client or regulatory requirements)
STEP 2
Collect inventorory (materials, energy and water use, site operations)
STEP 3
Environmental impact assessment
Interpretation of results, optioneering and reporting
STEP 4


BUILDING ASSESSMENT INFORMATION
BUILDING LIFE CYCLE INFORMATION
SUPPLEMENTARY INFORMATION BEYOND THE BUILDING LIFE CYCLE
A1-3
PRODUCT STAGE
A4-5
CONSTRUCTION PROCESS STAGE
B1-7
USE STAGE
C1-4
END OF LIFE STAGE
D
A1
A2
A3
A4
A5
B1
B2
B3
B4
B5
C1
C2
C3
C4
Raw material supply
Transport
Manufacturing
Transport
Comstruction installation process
Use
Maintenance
Repai
Replacement
Refurbishment
De-constrction demolition
Trasnport
Waste rpocessing
Disposal
Benefits and loads beyond the system boundary
Reuse
Recovery
Recycling
Potential
B6
Operational energy use
B7
Operational water use
Crandle to gate
Crandle to pratical completion
Crandle to grave
Crandle to crandle

I dati sommariamente necessari all'analisi LCA in ambito edilizio sono la quantità e la tipologia di:

- Materiali che compongono l'involucro;
- Materiali utilizzati per le opere accessorie;
- Materiali costituenti gli impianti;
- Materiali ausiliari in cantiere;
- Materiali per manutenzione ordinaria;
- Consumi energetici di cantiere;
- Consumi di energia e materia in fase d'uso (energia elettrica, combustibili, acqua, ecc..)
- Previsione della vita utile dell'edificio;
- Consumi di energia e materiali in fase di smantellamento dell'edificio. [42]

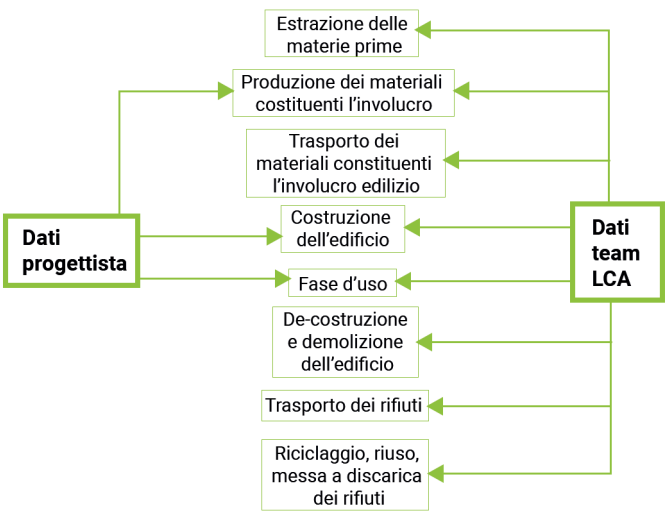


Figura 95: Fasi dello studio LCA: ruolo del progettista e del team LCA.

Fonte: Elaborazione propria basata su "Pollo, R. (2014). Un approccio consapevole alla progettazione : dall' LCA al BIM. [Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile]. Politecnico di Torino. "

[42] Pollo, R. (2014). Un approccio consapevole alla progettazione : dall' LCA al BIM. [Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile]. Politecnico di Torino.

I dati primari e secondari raccolti nella prima fase vengono utilizzati nella fase successiva (*Life Cycle Inventory*) per misurare le materie prime e le energie in entrata utilizzate per la fabbricazione di un prodotto.

La terza fase, denominata *Life Cycle Impact Assessment*, ha l'obiettivo di quantificare gli impatti ambientali annessi al ciclo vita del prodotto, i quali verranno successivamente discussi criticamente nell'ultima fase, al fine di ottenere dei miglioramenti.

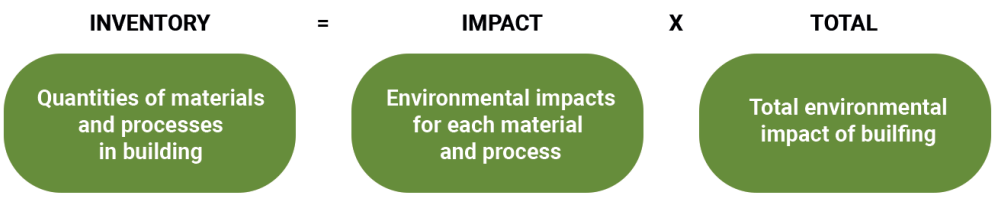


Figura 96: Il processo dell'LCI.

*Fonte: Elaborazione propria basata su "*2021 One Click LCA".

LCA nelle diverse fasi del progetto

L'esecuzione dell'LCA è influenzata dalla quantità di dati disponibili strettamente connessi alla fase in cui si trova l'edificio, ovvero durante la progettazione concettuale, la progettazione esecutiva, la costruzione e l'approvvigionamento e fase di utilizzo (Figura 97).

Effettuare un'analisi LCA all'avvio del processo progettuale, denominata LCA di *screening*, permette di compiere scelte tra un ventaglio di soluzioni maggiore, guidando il design del manufatto edilizio nella scelta di materiali e soluzioni tecnologiche a basso impatto ambientale.

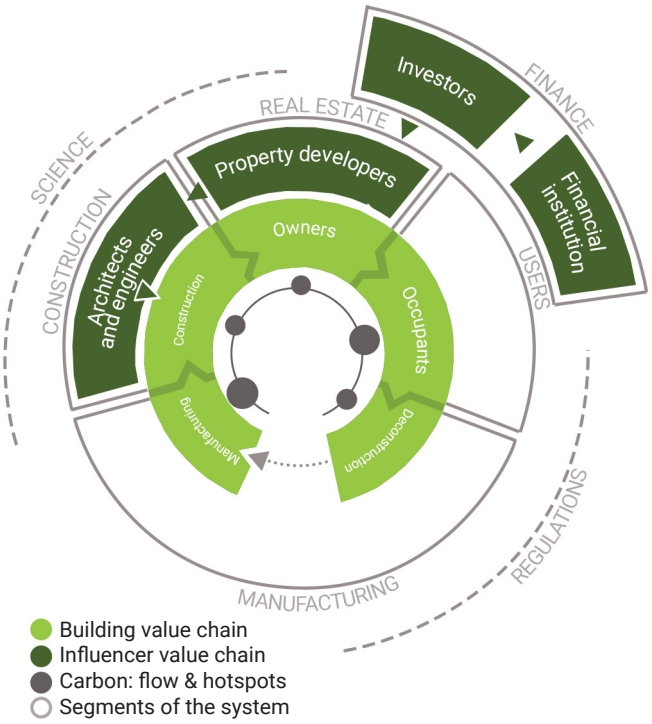
Figura 97: Quantità e origine dei dati adattati ad ogni fase del progetto per l'analisi LCA.

Fonte: Elaborazione propria.

	CONCEPT DESIGN	DETAIL DESIGN	PROCUREMENT	USE STAGE
Construction stages	Sketch or concept	BIM model	Building in construction	Building in use and adaption
Material quantities	Data can be obtained from cost estimation tools or early design tools like Rhinoceros 3D, Tekla Structural Designer. Alternatively, model can be generated with Carbon Designer.	Detailed design drawings or BIM models.	Construction drawings, BIM models and cost plans of final materials.	Actual quantities.
LCA workflow	Carbon Designer baseline.	Compare designs.	Benchmarking select best products from manufactures EPDs.	Interior fit outs and refurbishments.

Figura 98: Il sistema dell'edificio.

Fonte: Elaborazione propria basata su "The Building System Carbon Framework. (2021). World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). "



L'applicazione della LCA, già nella fase di progettazione preliminare di un edificio, può fornire indicazioni oggettive di natura energetico-ambientale al fine di supportare le successive fasi di progettazione esecutiva. Ciò consente di attribuire agli elementi e ai componenti strutturali ed impiantistici i corrispondenti impatti ambientali di ciclo di vita, fornendo dunque uno strumento operativo nel processo decisionale.
Individuare e indirizzare le scelte progettuali aventi tecniche costruttive e carichi energetici e ambientali di ogni singolo materiale che, a livello complessivo di sistema edilizio, corrispondano al minor consumo di risorse e impatti am-

bientali è l'obiettivo dell'uso della metodologia LCA nel processo progettuale.
L' LCA è quindi utilizzabile per effettuare confronti, anche in fase preliminare, tra diverse ipotesi di progetto. In seguito è possibile utilizzare nuovamente il metodo LCA per valutare l'efficacia delle eventuali proposte di cambiamento e/o miglioramento (fase di *Life Cycle Improvement*). [43]

Con il progredire del progetto, la capacità di ridurre i costi e la quantità di emissioni di carbonio diminuisce drasticamente (Figura 100).

Fase del progetto	Quantità di materiale	Dati LCA
Fase concettuale **Vantaggi in questa fase:** -maggiori risparmi di carbonio -Flessibilità molto elevata -Capacità di fissare obiettivi e fare scelte importanti	I dati possono essere ottenuti da strumenti di stima dei costi o da strumenti di progettazione iniziali come Rhinoceros, Tekla	Dati generici o utilizzando assiemi per elemnti costruttivi che contengono tutti gli strati e meteriali. È possibile usare EPD.
Fase di progettazione dettagliata **Applicazione della LCA in questa fase:** -Confronti tra diverse alternative progettuali -Analisi comparativa del carbonio	Disegni di progettazione dettagliati o modelli BIM	Utilizzare EPD generici con prestazioni di fascia media
Costruzione e fase di appalto **Scopo della LCA in questa fase:** -LCA dettagliata per certificazioni -Rispettare le normative	Disegni costruttivi, Modelli BIM e costi planimetrie dei materiali finali	Utilizzare EPD specifici, Modellare il prodotto da sè Usare dati secondari simili

Figura 99: Come cambia l'analisi LCA per ogni fase del progetto.

*Fonte: Elaborazione propria basata su "*2021 One Click LCA".

Figura 100: Le opportunità di riduzione dell'EC nelle fasi della progettazione.

Fonte: 2021 One Click LCA

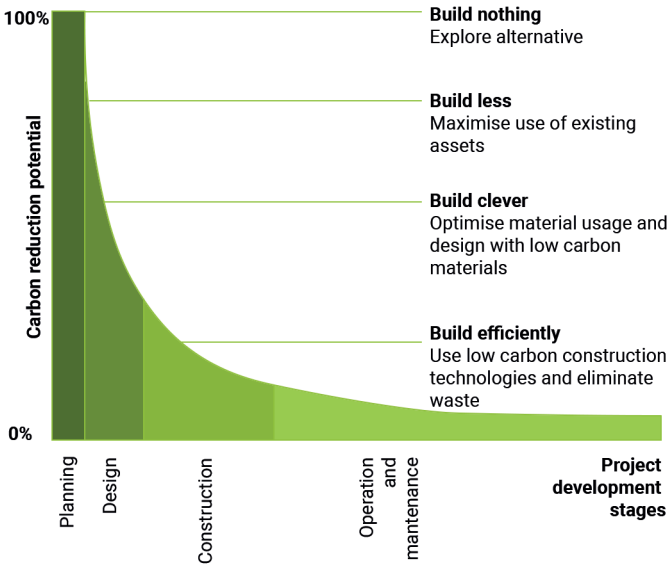
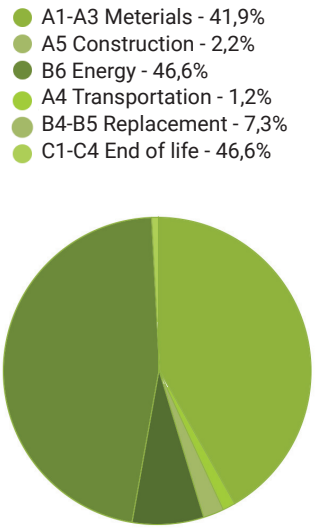


Figura 101: Gli impatti del GWP nel ciclo vita dell'edificio.

*Fonte: Elaborazione propria basata su "*2021 One Click LCA".



L' LCA più accurata viene invece eseguita in seguito alla realizzazione del manufatto considerando le quantità e le tipologie di materiale effettivamente adoperate. [44]

La Figura 99 mostra le soluzioni per ciascuna fase del progetto.

Nel grafico 101 è illustrato come il *Global Warming Potential* si distribuisce tra le diverse fasi del ciclo vita di un edificio. Si osserva come il 41,9 % del GWP prodotto si riferisca all'impiego dei materiali da costruzione, confermando la loro importanza come fonti di emissioni.

[43] Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). Analisi del ciclo di vita LCA. Edizioni Ambiente.

[44] © 2021 One Click LCA LtdAll rights reserved. (2021). Decarbonizing construction Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon. https://www.oneclicklca.com/decarbonizing-construction-report/

2.3 L'applicazione dell'LCA al caso studio

In questa sezione sono descritti i tre diversi software utilizzati nell'analisi LCA per il caso studio *Circular Tower* (ZPF-tool, SimaPro e One Click LCA), le metodologie e i risultati ottenuti.
Il presente capitolo riporta inizialmente in modo descrittivo per ogni software un quadro generale del programma in cui vengono descritti la caratterizzazione dei dati di input, i confini del sistema e i calcoli dell'impatto ambientale effettuabili. In seguito, è specificato il workflow dell'applicazione del software al caso studio descrivendo i risultati ottenuti, le potenzialità e i limiti dei programmi impiegati .
Il confronto critico è nato dalla volontà di mettere in risalto le peculiarità di ogni programma al fine di orientare la scelta del suo utilizzo in base alla fase di progettazione in cui si trova e di conseguenza ai dati disponibili.
I tre software, aventi case produttrici diverse, richiedono degli input con un differente grado di accuratezza. Sono stati messi a confronto i risultati ottenuti per comprendere se, nelle prime fasi di progetto, l'utilizzo dei software che richiedono dati più generici sono equiparabili ai software più elaborati. Tra gli output generati sono stati presi in analisi le emissioni di CO_2 equivalenti (GWP), il consumo di risorse ottenute da fonti non rinnovabili e i punti di impatto ambientale (UBP).

2.3.1 ZPF-tool

Nel bando di concorso, TecLab, ovvero il committente, mira ad ottenere un progetto che risponda a requisiti di sostenibilità attraverso la quantificazione degli impatti, richiesta ai progettisti con il software ZPF-tool. Si tratta di un foglio di calcolo Excel, sviluppato da *Immobilien Basel-Stadt* (IBS) e *ZPF Ingenieuren* per la stima dell'equilibrio ecologico degli edifici.
ZPF-tool viene spesso utilizzato in Svizzera nei concorsi con lo scopo di classificare approssimativamente, in termini di sostenibilità ecologica, gli edifici sulla base di una piccola quantità di informazioni [45]. Questa procedura avviene utilizzando il metodo dell'analisi del ciclo di vita considerando determinati valori adattati dai "Dati di valutazione del ciclo di vita nel settore delle costruzioni" della banca dati svizzera *KBOB*, a partire dal 2016. Per giungere ai risultati finali è sufficiente considerare i solai, le partizioni interne e le chiusure verticali per una valutazione approssimativa del manufatto edilizio.
Il software risulta quindi essere uno strumento semplificato ma utile ai progettisti in fase decisionale per attuare scelte consapevoli in merito ai materiali utilizzati attraverso il confronto tra soluzioni diverse.

[45] Marugg, F. (2022, August 8). Stadt aus Holz. Wüest Partner. https://www.wuestpartner.com/ch-de/2022/08/04/stadt-aus-holz/

Caratterizzazione dei dati di input

Il *tool* ZPF messo a disposizione da TecLab si presenta suddiviso in più fogli di calcolo e in lingua tedesca.
Per facilitare la lettura, nel capitolo seguente verranno riportate le voci tradotte in lingua italiana. La traduzione è stata svolta dagli autori e può presentare eventuali errori.
All'intero del primo foglio di calcolo vengono riportate le istruzioni generali per guidare gli utenti nell'utilizzo del programma.
Il secondo foglio di calcolo, chiamato *vista generale*, contiene una tabella riassuntiva con i dati di input di tutti gli elementi che costituiscono l'edificio, ovvero opere interrate, partizioni interne, solai, chiusure verticali opache, solaio di copertura e infine la voce "tecnica della casa" (Figura 103).
Le uniche caselle editabili servono per inserirvi il dato di superficie del solaio controterra e della copertura, delle quali non vengono specificate le stratigrafie. Un ulteriore dato fondamentale è quello della superficie dei locali riscaldati, poiché il calcolo dell'impatto ambientale è riferito alla sola porzione climatizzata dell'edificio.
Affiancati a questa tabella riassuntiva sono posizionati i grafici finali di output.
I successivi fogli di calcolo sono denominati rispettivamente con le voci: muri, facciata e solai. Ognuno di essi si presenta come un foglio

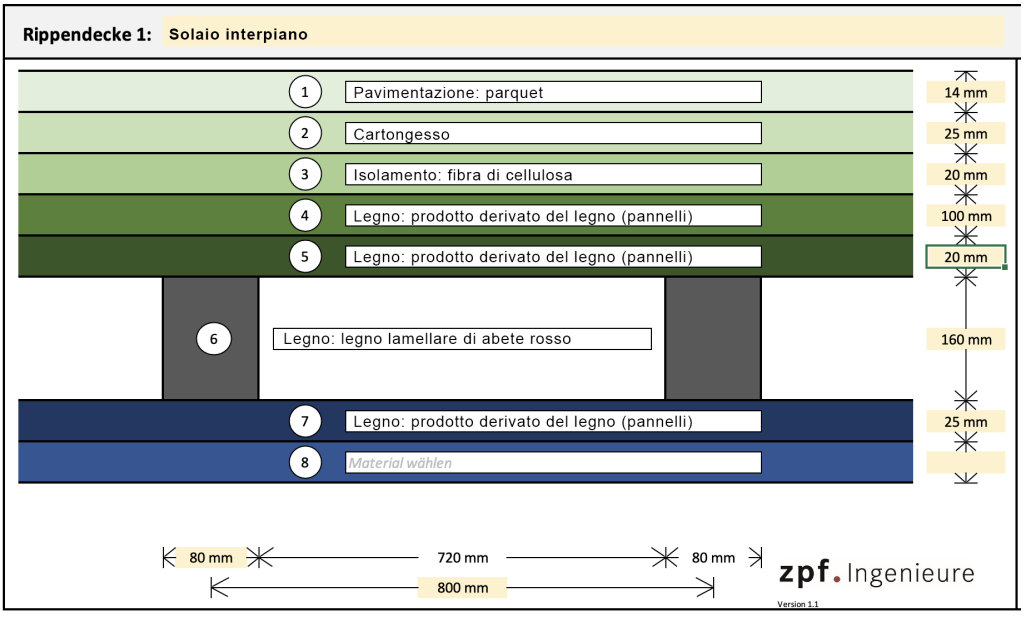
Figura 102: Schermata tipo della sezione per la compilazione dei dati di un solaio interpiano nel software ZPF.

Fonte: Schermata acquisita dal software ZPF.

compilativo. All'interno di essi vi sono le diverse soluzioni tecnologiche più comuni, graficizzate in stratigrafie (Figura 102). Per ogni *layer* della stratigrafia è necessario selezionare attraverso un menù a discesa standardizzato la voce che corrisponde, in modo più similare, al materiale utilizzato. Inoltre, per ogni soluzione tecnologica è necessario indicare la sua estensione nell'edificio, in metri quadri.

L'unità funzionale richiesta dal software per effettuare l'analisi è il metro quadro riferito alla superficie riscaldata.

In seguito alla compilazione dei fogli di calcolo riguardanti gli elementi del sistema costruttivo, nella pagina "vista generale" è possibile osservare i risultati di impatto ambientale mediante i grafici a torta e a barre, aggiornati automaticamente grazie al collegamento dei fogli.



	Designazione
Totale	Zona di riferimento energetico
Opere interrate	Pareti interni isolate Pareti esterne della cantina non isolate Solaio coibentato Piastra del pavimento non isolato
Pareti interne	Pareti interne del locale tecnico Pareti interne tra vano scala e ambiente riscaldato Pareti interne nel vano scala Partizioni interne
Solai	Solai interpiano
Chiusure verticali opache	Involucro
Copertura	Copertura piana Copertura a falde
Tecnologia della casa	Sistema elettrico Impianto termico Sistema di ventilazione Sistema idraulico

Figura 103: Tabella riassuntiva nel foglio "Veduta generale" del software ZPF.

Fonte: Schermata acquisita dal software ZPF tradotta in italiano.

Superficie [m^2]	UBP [UBP/m^2/a]	Energia primaria non rinnovabile [kWh_{oileq}/m^2/a]	THG [kg_{CO2eq}/m^2/a]
550	**10.216**	**23,9**	**5,5**
0			
0			
139	904	1,86	0,68
0			
Interrato totale	**904**	**1,9**	**0,7**
26	20	0,08	0,02
210	376	0,86	0,17
160	270	0,62	0,12
45	22	0,09	0,02
Copertura totale	**687**	**1,7**	**0,3**
411	2.707	7,55	1,50
Solai totale	**2.707**	**7,5**	**1,5**
1.200	859	2,52	0,52
Facciata totale	**859**	**2,5**	**0,5**
139	686	2,92	0,74
0			
Copertura totale	**686**	**2,9**	**0,7**
550	1.574	1,85	0,42
550	497	1,56	0,35
550	1.500	2,32	0,53
550	801	1,62	0,38
Tecniche della casa totale	**4.372**	**7,4**	**1,7**

Elenco dei prodotti disponibili su ZPF

1. Legno: abete massiccio / abete
2. Legno: faggio massiccio / rovere
3. Legno: legno lamellare incollato abete/ abete
4. Legno: legno incollato e lamellare faggio/ rovere
5. Legno: derivati del legno (pannelli)
6. Legno: listelli
7. Calcestruzzo: Pavimenti in CA
8. Calcestruzzo: Pavimenti compositi
9. Calcestruzzo: muri in cemento armato
10. Calcestruzzo: sottofondo in cemento, anidrite, cemento duro
11. Lamiera d'acciaio, lucida
12. Lamiera di acciaio zincato
13. Profilo in acciaio
14. Profilo in acciaio, zincato
15. Alluminio
16. Lamiera di rame, nuda
17. Lamiera di ottone/bronzo
18. Lamiera di acciaio cromato stagnato
19. Sottostruttura a montanti e traversi di facciata
20. Sfusi: graniglia, ghiaia, sabbia
21. Muratura: mattone pieno
22. Muratura: mattone forato
23. Muratura: mattoni in arenaria calcarea
24. Cartongesso
25. Pannello in fibrocemento
26. Facciata: vetro
27. Facciata: lastra di pietra
28. Isolamento: lana di vetro
29. Isolamento: lana di roccia
30. Isolamento: EPS
31. Isolamento: XPS
32. Isolamento: PUR/PIR
33. Isolamento: fibra morbida
34. Isolamento: fibra di cellulosa
35. Isolamento: paglia
36. Rivestimento del pavimento: linoleum
37. Pavimentazione: PVC
38. Pavimentazione: piastrelle
39. Pavimentazione: parquet
40. Pavimentazione: Moquette
41. Pavimentazione: Terrazzo
42. Pavimentazione: pietra naturale
43. Pellicola in PE
44. Intonaco interno
45. Intonaco esterno (su superficie dura)
46. Intonaco esterno (su isolamento)

Confini del sistema

Il software non fornisce indicazioni specifiche in merito ai confini di sistema utilizzato nell'analisi, ovvero ai moduli standard definiti dalle normative EN 15804 e ISO 21930.
La Svizzera, non facendo parte dell'UE, non è tenuta a sottostare alle normative europee e questo può giustificare l'assenza di determinate indicazioni.

Un ulteriore dato che non è specificato è quello che definisce la durata della vita utile dell'edificio. Si presuppone che il confine del sistema includa la fase d'uso dell'edificio osservando la presenza della voce tecniche della casa. Questo valore è calcolato dal software sulla base della normativa svizzera SIA 380 [46] che considera un consumo di energia utilizzata al fine del riscaldamento, della produzione di acqua calda sanitaria, della ventilazione e dell'aria condizionata pari a 16 kW/m^2 per gli edifici di nuova costruzione. Si può affermare che la voce tecniche della casa rappresenti l'Operational Energy.

[46] SIA. (2015). Nozioni di base per il calcolo energetico degli edifici - SIA 380.

Calcolo dell'impatto ambientale

Il programma ZPF fornisce in output, in seguito all'inserimento dei dati richiesti, due tipologie di grafico.

La prima tipologia comprende tre grafici a torta. Il primo grafico descrive in percentuale, con il metodo dei Punti di Impatto Ambientale misurati in UBP/m^2/a, la responsabilità dei diversi elementi edilizi.

UBP
Il metodo dei Punti di Impatto Ambientale ha l'obiettivo di sintetizzare gli effetti di un prodotto sull'ambiente secondo un unico parametro.
Per effettuare questo eco bilancio è necessaria la definizione del prodotto, la rilevazione dei flussi di sostanze e di energia associati all'intero ciclo vita e infine l'individuazione delle emissioni nel suolo, nell'acqua e nell'aria, nonché le risorse necessarie.
Il risultato è ottenuto attraverso dei fattori di caratterizzazione ponderazione e normalizzazione.

Il secondo grafico nominato *Emissioni di gas serra* identifica in percentuale come i macro componenti dell'edificio di progetto siano responsabili della produzione di CO_2 equivalente calcolata in kg di $CO_2/m^2/a$.
I dati espressi dalla voce tecniche della casa, rappresentanti le emissioni prodotte dall'uso delle componenti impiantistiche, sono considerabili come *Operational Carbon* (OC), mentre a tutte le altre voci corrispondono all'*Embodied Carbon* (EC).

L'ultimo grafico a torta riporta le percentuali di consumo di Energia Primaria non rinnovabile, calcolata in $kWh_{oil}/m^2/a$ per ogni macro elemento.

Infine, il grafico a barre riporta quantitativamente i dati di impatto ambientale, le emissioni di CO_2 e il consumo dell'Energia Primaria facendo riferimento all'intero edificio, senza suddividere le macro componenti.
Le barre sono divise in tre colori. Il verde indica un range per il quale il valore raggiunti si rivelano ottimali, l'azzurro suggerisce il raggiungimento di un valore medio mentre il grigio definisce la bassa qualità.
Si può così comprendere se le scelte effettuate hanno prodotto risultati vantaggiosi dal punto di vista dell'impatto ambientale, delle emissioni di CO_2 e del consumo di Energia Primaria.

Workflow

In seguito alla definizione volumetrica dell'edificio, delle superfici riscaldate e non riscaldate, giunti a determinare le tipologie di materiali e soluzioni tecnologiche, sono state operate delle scelte verso le soluzioni aventi minor impatto ambientale.
Consci delle qualità e delle opportunità che l'utilizzo del legno e dei suoi derivati offrono, quest'ultimo è stato prediletto evitando quanto più possibile l'utilizzo di materiali provenienti da fonti non rinnovabili.

Il processo di scelta dei materiali è stato compiuto simultaneamente alle scelte progettuali tecnologiche della *Circular Tower*. La comodità data dalla richiesta di sole due tipologie di input , le superfici e i materiali, ha permesso di aggiornare i fogli di calcolo in maniera rapida e in itinere, di pari passo con la definizione del disegno tecnico.

La selezione nel software di alcuni materiali è stata adattata alle scelte accessibili poiché nella banca dati disponibile sono presenti i prodotti più comuni e raggruppati in macro categorie. Si riportano come esempio l'adeguamento dei pannelli OSB e dei pannelli in legno mineralizzato con la voce "derivati del legno" effettuando così un'evidente approssimazione.

Infine, si è proceduto con il calcolo delle superfici, rappresentanti l'unità funzionale dell'analisi, utilizzando il software di modellazione tridimensionale *Revit*. Nel conteggio delle superfici verticali che delimitano l'ambiente riscaldato viene calcolata la superficie lorda indicando quanta parte di essa risulta trasparente. Non è richiesto di specificare la tipologia di serramento e la stratigrafia del vetro progettata poiché l'involucro trasparente è escluso dal calcolo (Figura 105).
In merito alle superfici orizzontali, la superficie calcolata si riferisce unicamente alla porzione dei solai riscaldati che ammonta a 793 metri quadri.

Alle voci *pareti interrate isolate*, *pareti interrate non isolate* e *piastra del pavimento non isolato* presenti sotto la categoria *opere interrate*, identificata con il colore grigio, il valore risulta nullo poiché progettualmente è stato deciso di non predisporre vani interrati, limitando così gli impatti generati dalla movimentazione del suolo e riducendo le problematiche di scavo legate alla gestione del cantiere dato lo spazio ridotto dell'area. Nella sezione *copertura* identificata con il colore viola, il valore nullo è rappresentato dalla voce *tetto a falde* poiché è stato deciso di utilizzare una tipologia di copertura piana calpestatile definita *blue roof* in grado di immagaz-

zinare l'acqua piovana e di generare uno spazio *outdoor* panoramico e praticabile.
La compilazione dei fogli di calcolo è risultata essere molto agevole e rapida grazie all'utilizzo dei menù a tendina e dei limitati dati di input inseribili. (Figura 105)

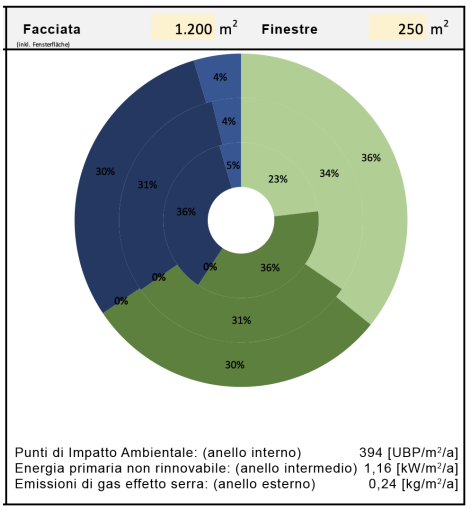
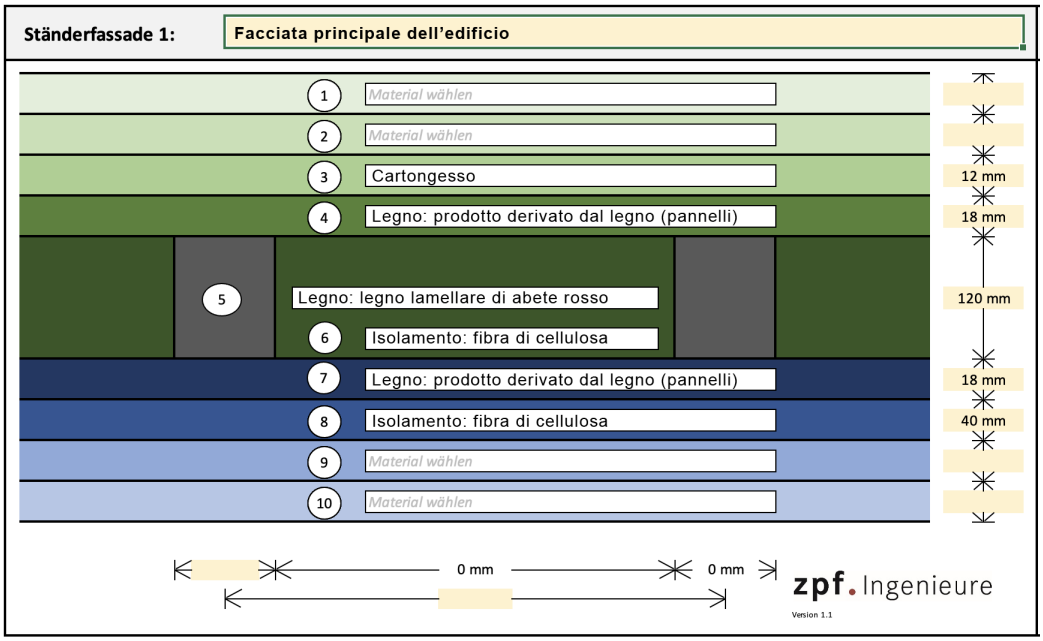
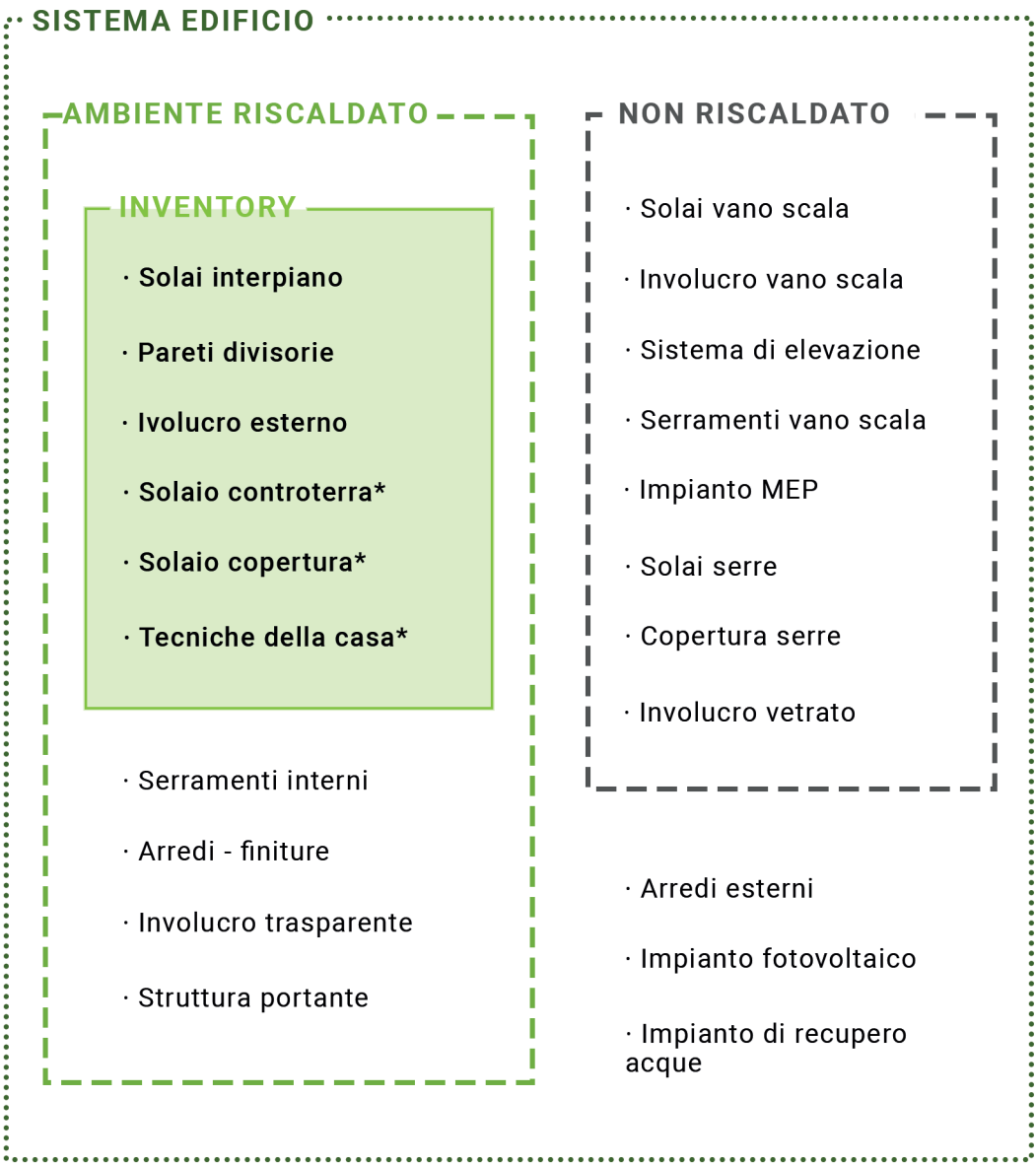


Figura 104: Quantità degli impatti ambientali in percentuale dei materiali nel componente "facciata". Fonte: Schermata acquisita dal software ZPF.

Figura 105: Schermata tipo della sezione per la compilazione dei dati delle chiusure verticali opache nel software ZPF. Fonte: Schermata acquisita dal software ZPF





Componenti dell'edificio analizzabili con ZPF

* *Componenti facenti parte dell'inventario ma definiti di default da ZPF*

Figura 106: Confine del sistema nell'analisi LCA mediante ZFP-tool.

Fonte: Elaborazione propria.

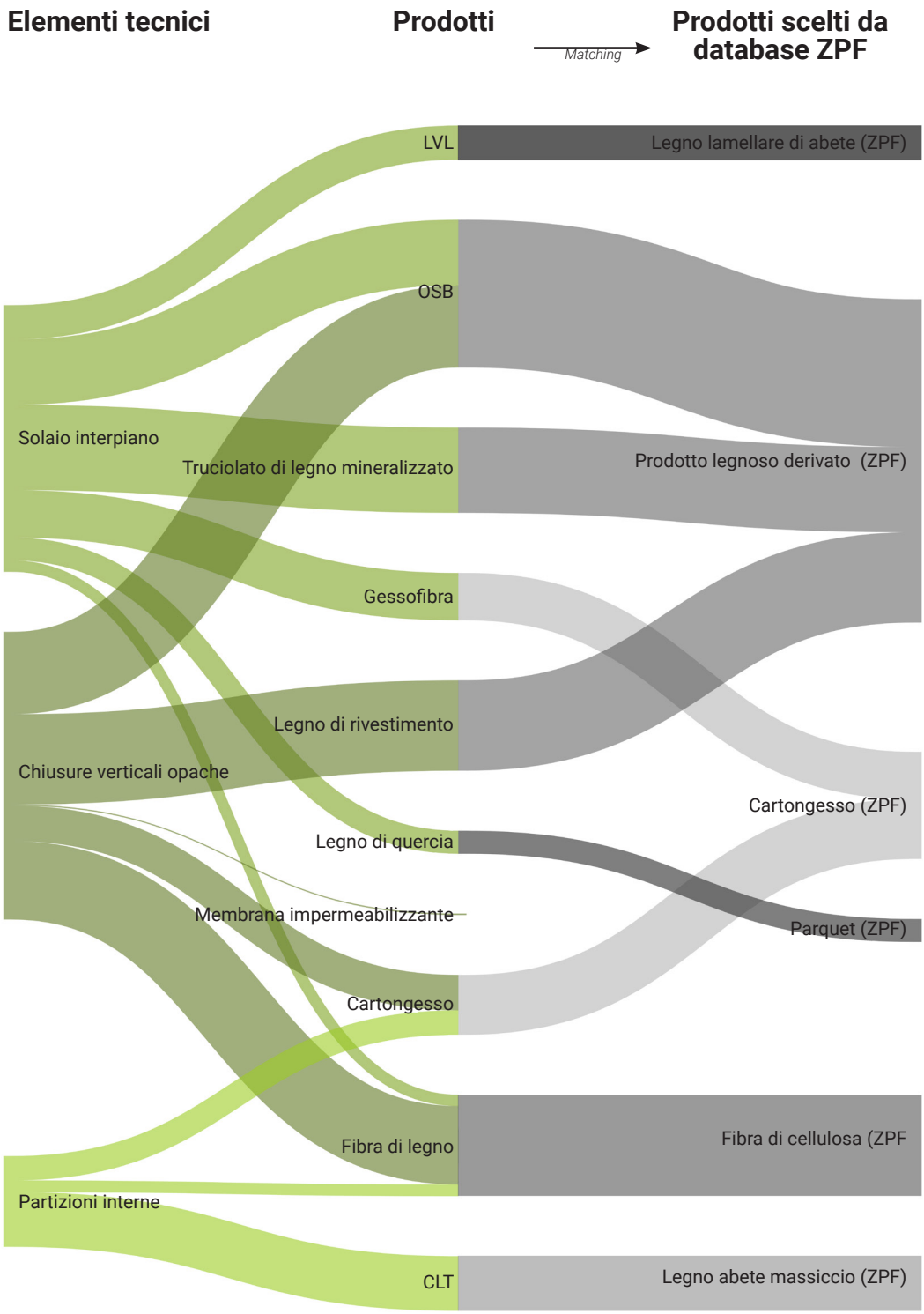

Elementi tecnici
Prodotti
Matching
Prodotti scelti da database ZPF
LVL
OSB
Solaio interpiano
Truciolato di legno mineralizzato
Gessofibra
Legno di rivestimento
Chiusure verticali opache
Legno di quercia
Membrana impermeabilizzante
Cartongesso
Fibra di legno
Partizioni interne
CLT
Legno lamellare di abete (ZPF)
Prodotto legnoso derivato (ZPF)
Cartongesso (ZPF)
Parquet (ZPF)
Fibra di cellulosa (ZPF
Legno abete massiccio (ZPF)

Figura 107:
Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software ZPF.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software online SankeyMATIC: Build a Sankey Diagram. (n.d.). https://sankeymatic.com/build/

Il diagramma in figura 107 rappresenta schematicamente il processo di inventario effettuato per il software ZPF.
Il diagramma si presenta diviso in tre colonne.
La prima riporta gli elementi tecnici che è stato possibile analizzare, la seconda riguarda i materiali scelti nella fase progettuale e nella terza e ultima colonna è riportato il materiale corrispondente tra quelli selezionabili dalla banca dati del software.
Per comporre il diagramma è stata calcolata la quantità della massa di ogni materiale presente nell'edificio che viene rappresentata dalla dimensione delle linee di flusso.
La membrana impermeabilizzante non risulta essere ricondotta a nessun output poiché esclusa dal calcolo a causa del suo spessore troppo ridotto.
Si può notare che una grande quantità di materiali tra cui OSB, truciolato di legno mineralizzato e il legno di rivestimento, sono stati raccolti sotto la voce "prodotto legnoso derivato".

Analisi dei risultati ottenuti

Osservando le percentuali riportate nella Figura 108 in merito ai Punti di Impatto Ambientale misurati in UBP/m²/a si può notare come il colore rosso, dato dalla voce *tecniche della casa*, sia quello più rilevante, pari al 43% (4372 UBP/m²/a), calcolato in modo autonomo dal software mediante l'applicazione della normativa svizzera SIA 380. Il secondo dato più rilevante è quello dei solai aventi un impatto del 26% (2707 UBP/m²/a) rispetto al totale. La copertura, la facciata, le partizioni interne e il solaio controterra, identificati rispettivamente con i colori viola, arancione, verde e grigio, hanno un impatto simile, in un intervallo compreso tra 7 al 9%.

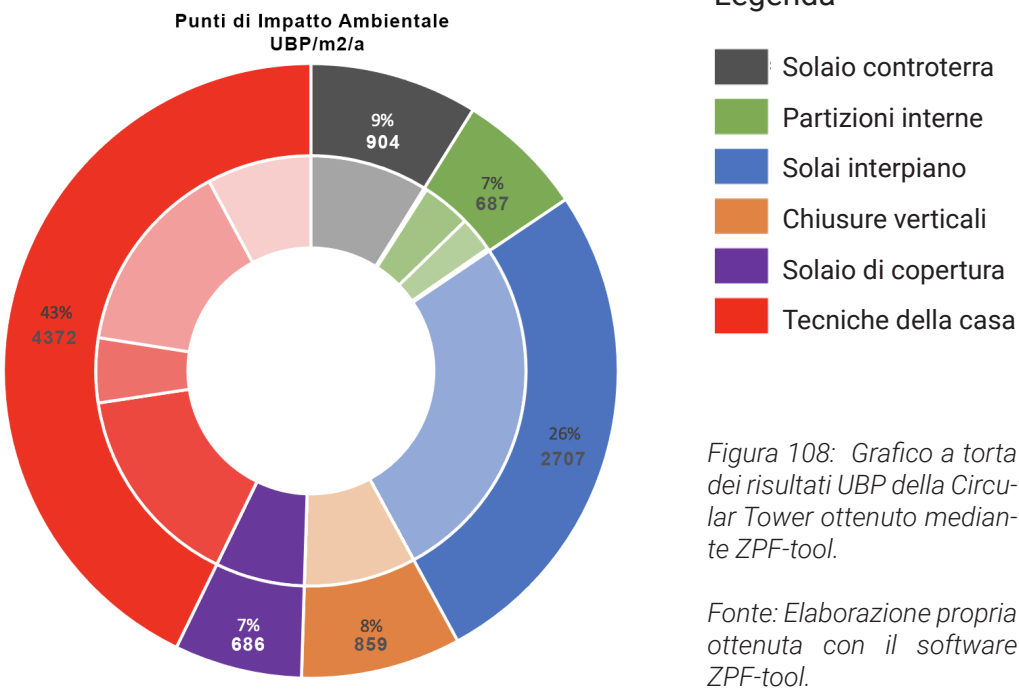


Figura 108: Grafico a torta dei risultati UBP della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.

Fonte: Elaborazione propria ottenuta con il software ZPF-tool.

Come nel grafico precedentemente descritto, anche per le emissioni di gas serra (Figura 109) le voci *tecniche della casa* (31% - 1,6022 $kgCO_{2eq}/m^2/a$) e *solai* (28% - 1,5012 $kgCO_{2eq}/m^2/a$) risultano essere i maggiori responsabili della produzione di CO_2, in modo proporzionale ai loro Punti di Impatto Ambientale. Le emissioni generate dai materiali che compongono il solaio di copertura sono maggiori rispetto a quelle dei componenti delle chiusure verticali, delle partizioni interne e del solaio controterra.

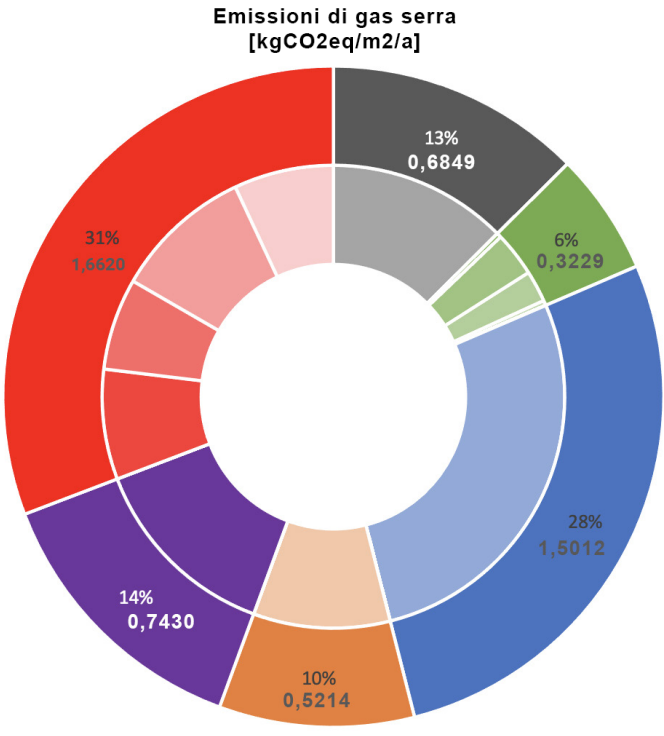


Figura 109: Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO_{2eq} della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.

Fonte: Elaborazione propria ottenuta con il software ZPF-tool.

Infine, l'ultimo grafico a torta (Figura 110) riporta le percentuali di consumo di Energia Primaria non rinnovabile, calcolata in $kWh_{oil}/m^2/a$ per ogni macro elemento. Infine, l'ultimo grafico a torta riporta le percentuali di consumo di Energia Primaria non rinnovabile, calcolata in $kWh_{oil}/m^2/a$ per ogni macro elemento. Anche in questo caso le percentuali più alte sono quelle della voce *solai* e *tecnica della casa*.

L'energia primaria consumata per la produzione dei materiali che compongono i solai (32%) è superiore di un punto percentuale rispetto alla voce *tecniche della casa* (31% - 1,8626 $kWh_{oileq}/m^2/a$). Quest'ultima rappresenta l'*Operational Energy*, cioè il consumo di energia necessario per mantenere le giuste condizioni ambientali interne all'edificio durante la fase d'uso.

L'energia necessaria per la realizzazione, l'utilizzo, la manutenzione e lo smaltimento dei seguenti componenti, costituente l'*Embodied Energy* (EE) è pari a:

-1,6524 $kWh_{oileq}/m^2/a$ (7%) partizioni interne,
-1,8626 $kWh_{oileq}/m^2/a$ (8%) solaio controterra,
-2,5218 $kWh_{oileq}/m^2/a$ (11%) facciata,
-2,9190 $kWh_{oileq}/m^2/a$ (12%) solaio di copertura,
-7,5489 $kWh_{oileq}/m^2/a$ (32%) solai interpiano.

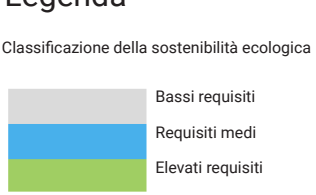
Dal grafico a barre è possibile comprendere che le scelte effettuate hanno prodotto risultati vantaggiosi dal punto di vista dell'impatto ambientale, delle emissioni di CO_2 e del consumo di EP.

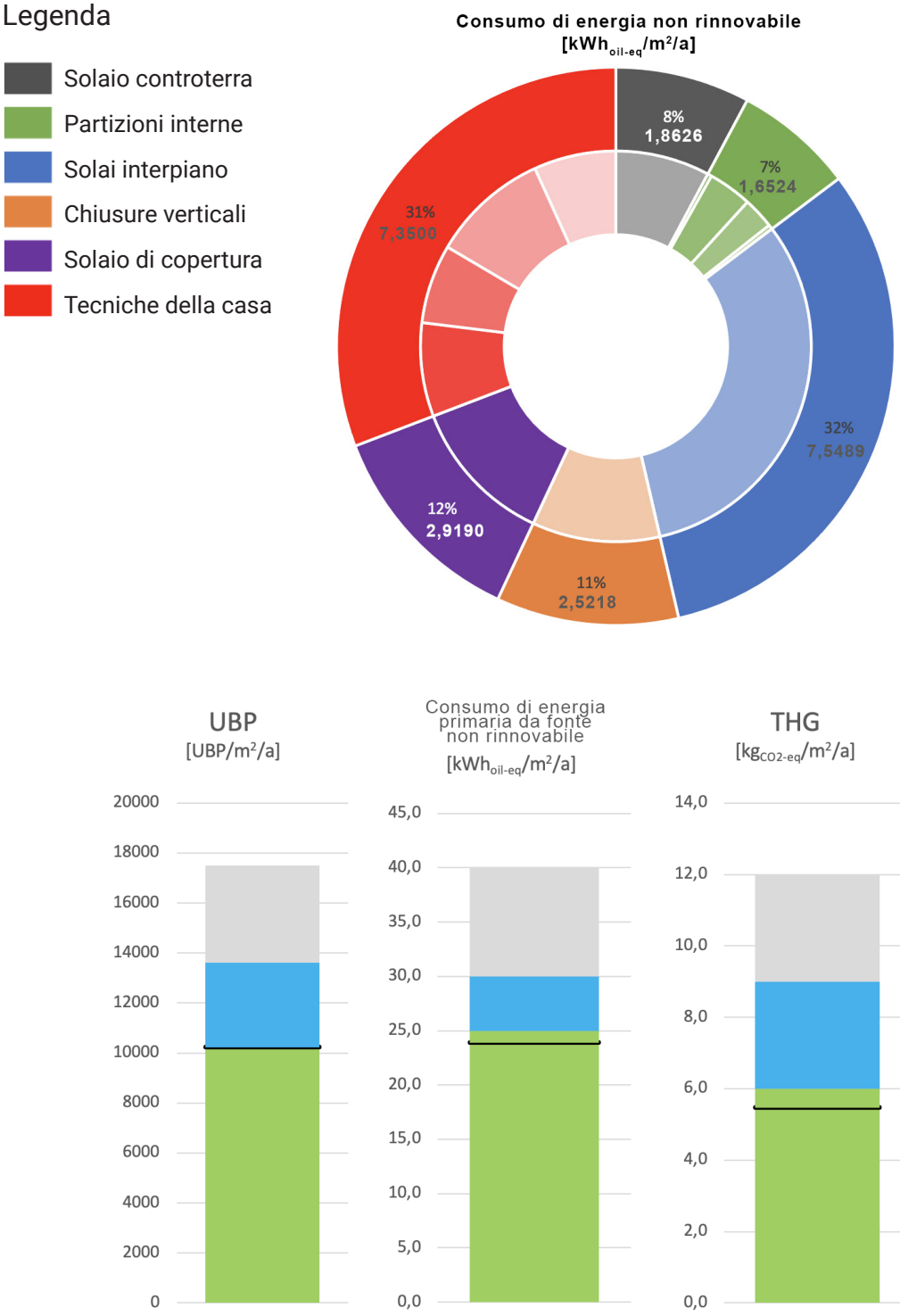
Figura 110: Grafico a torta dei risultati del consumo di energia primaria da fonte non rinnovabile della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.

Fonte: Elaborazione propria ottenuta con il software ZPF-tool.

Figura 111: Grafico a barre dei risultati a confronto con i benchmark ottenuto mediante ZPF-tool.

Fonte: Elaborazione propria ottenuta con il software ZPF-tool.




Legenda
Solaio controterra
Partizioni interne
Solai interpiano
Chiusure verticali
Solaio di copertura
Tecniche della casa
Consumo di energia non rinnovabile
[kWh oil-eq/m²/a]
8%
1,8626
7%
1,6524
32%
7,5489
11%
2,5218
12%
2,9190
31%
7,3500
UBP
[UBP/m²/a]
20000
18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Consumo di energia primaria da fonte non rinnovabile
[kWh oil-eq/m²/a]
45,0
40,0
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
THG
[kg CO2-eq/m²/a]
14,0
12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
0,0

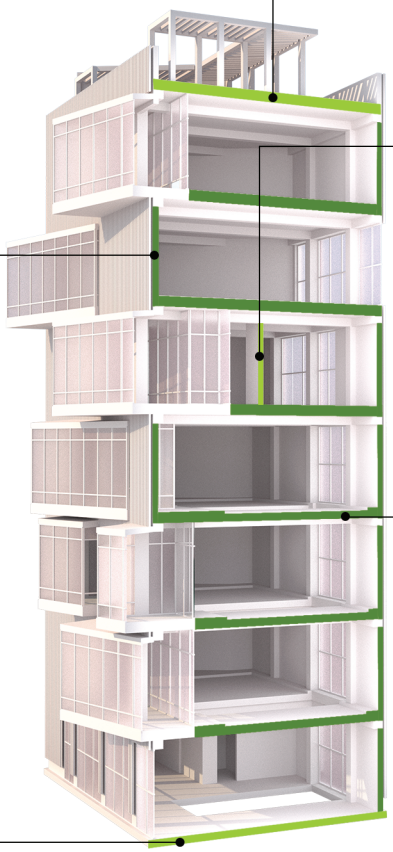
ZPF-tool

UNITÀ FUNZIONALE - m^2 DI SUPERFICIE RISCALDATA

CONFINE DEL SISTEMA - non specificato

GWP_{tot}: 3,77 $kgCO_{2eq}/m^2/a$

$EP_{nr,tot}$: 16,5 $kWh_{oil}/m^2/a$



SOLAI DI COPERTURA 139 m²

Dati di output

GWP:	0,743 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	2,919 $kWh_{oil}/m^2/a$
UBP:	686 $UBP/m^2/a$

PARTIZIONI INTERNE 281 m²

Dati di input

Fibra di legno:	
Fibra di cellulosa	*60mm*
Cartongesso:	
Cartongesso	*12mm*
CLT:	
Legno abete massiccio	*180mm*

Dati di output

GWP:	0,327 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	1,652 $kWh_{oil}/m^2/a$
UBP:	687 $UBP/m^2/a$

CHIUSURE VERTICALI 1200 m²

Dati di input

OSB:	
Prodotto derivato legnoso	*18mm*
Legno di rivestimento:	
Prodotto derivato legnoso	*30mm*
Cartongesso:	
Cartongesso	*12mm*
Fibra di legno:	
Fibra di cellulosa	*40mm*

Dati di output

GWP:	0,521 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	2,522 $kWh_{oil}/m^2/a$
UBP:	859 $UBP/m^2/a$

SOLAI INTERPIANO 641 m²

Dati di input

LVL:	
Legno lamellare abete	*180mm*
OSB:	
Prodotto derivato legnoso	*18mm*
Legno mineralizzato:	
Prodotto derivato legnoso	*100mm*
Gessofibra:	
Cartongesso	*25mm*
Legno di quercia:	
Parquet	*14mm*
Fibra di legno:	
Fibra di cellulosa	*20mm*

Dati di output

GWP:	1,501 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	7,549 $kWh_{oil}/m^2/a$
UBP:	2707 $UBP/m^2/a$

SOLAI CONTROTERRA 139 m²

Dati di output

GWP:	0,684 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	1,863 $kWh_{oil}/m^2/a$
UBP:	904 $UBP/m^2/a$

Elaborazione dei risultati

Di seguito vengono riportati i grafici dei risultati dell'Energia Primaria non rinnovabile impiegata e delle emissioni di CO_{2eq} rielaborati al fine di permettere successivamente un confronto immediato con gli altri software.
Sono stati esclusi i dati in merito alla voce *tecniche della casa* per rappresentare unicamente l'EE e l'EC, escludendo così la fase d'uso dell'edificio.
Questo procedimento è stato necessario al fine di effettuare un confronto idoneo con i dati prodotti da OneClick LCA e SimaPro utilizzati per il caso studio della Circular Tower.
Sono stati realizzati diagrammi a torta, similari agli output generati da ZPF-tool, per esprimere le percentuali di consumo e di immissioni di ogni categoria di componenti presa in analisi.
Inoltre, sono stati prodotti dei grafici a barre per mostrare in modo quantitativo i medesimi risultati a confronto.

Figura 112: Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software ZPF.

Fonte: Elaborazione propria.

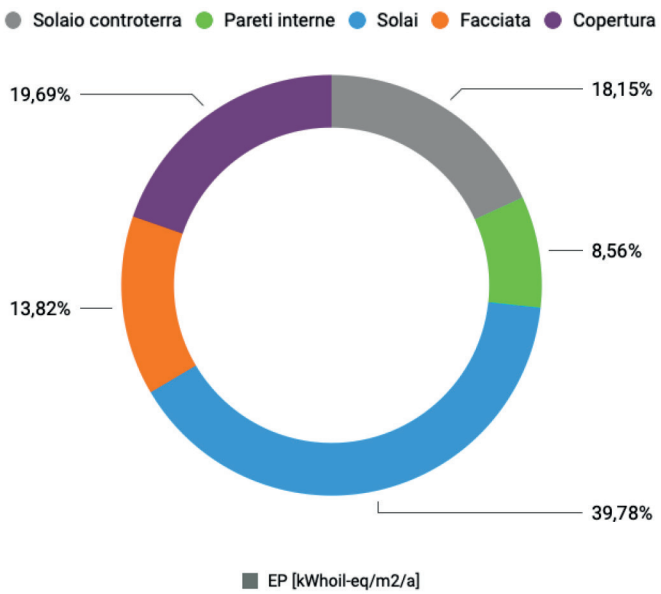


Figura 113: Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO_{2eq} della Circular Tower escludendo la voce "tecniche della casa". ZPF

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software ZPF-tool.

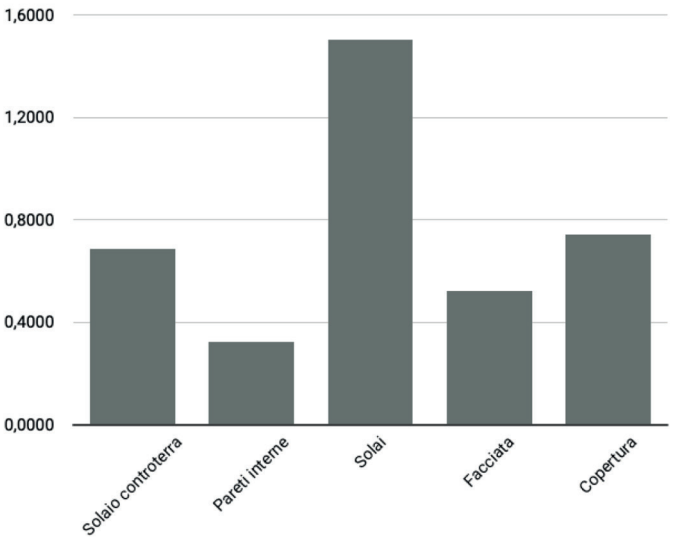


Figura 114: Grafico a barre dei risultati sulle emissioni di CO_{2eq} della Circular Tower escludendo la voce "tecniche della casa". ZPF

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software ZPF-tool.

Figura 115: Grafico a torta dei risultati del consumo di EP da fonte non rinnovabile escludendo la voce "tecniche della casa". ZPF

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software ZPF-tool.

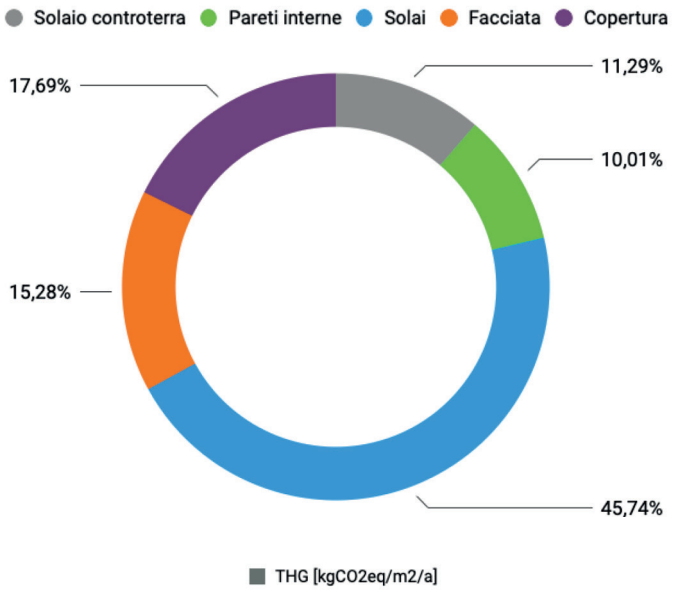
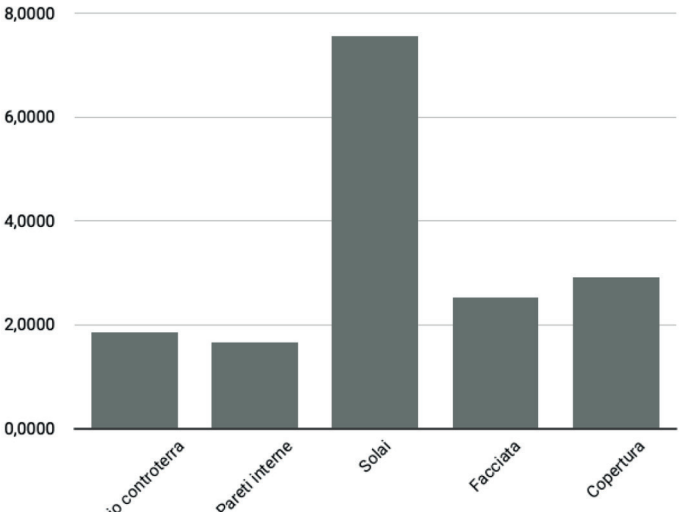


Figura 116: Grafico a barre dei risultati del consumo di EP da fonte non rinnovabile escludendo la voce "tecniche della casa". ZPF

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software ZPF-tool.



Potenzialità e limiti del software

In seguito all'utilizzo del software, sulla base dell'esperienza effettuata, è stato possibile delineare alcune connotazioni del programma ed è stato espresso un giudizio in merito ai suoi possibili utilizzi.

Fase di utilizzo
È stato ritenuto che questo software è ideale in una fase di *concept design* in modo da identificare delle linee guida nella scelta delle tipologie dei materiali.

Database
ZPF-tool è un programma *site specific*, messo a disposizione per concorsi sul territorio svizzero, è perciò sviluppato in lingua tedesca. A dimostrazione di questo, la banca dati del software attinge parzialmente dal database KBOB, anch'esso svizzero.
Essendo un software ideato per una fase di *concept design*, il database proposto da ZPF risulta generico e limitato ma di rapida consultazione.

Limiti nel calcolo
Un altro fattore che induce all'utilizzo del software in una fase di progetto iniziale è l'esclusione e l'approssimazione del calcolo di diverse tematiche:
- Non è previsto l'inserimento di dati quanti-

tativi e qualitativi relativi alla struttura portante;
- Sono presenti limitate soluzioni tecnologiche espresse mediante stratigrafie generiche che riducono il livello di dettaglio dei componenti;
- Non è previsto l'inserimento di dati quantitativi e qualitativi relativi alla copertura e al solaio controterra poiché il software utilizza dati predeterminati per giungere ai risultati;
- Vengono esclusi dal calcolo i dati specifici dei componenti trasparenti dell'involucro;
- Nonostante ZPF-tool non preveda l'inserimento dei dati riguardati le soluzioni impiantistiche dell'edifico, ne calcola il suddetto impatto ambientale ed inoltre non è previsto l'inserimento di dati riguardarti i sistemi di produzione e riduzione del consumo di energia e risorse.

Dati di input

Sarebbe opportuno permettere l'inserimento manuale delle stratigrafie dei componenti della copertura e del solaio controterra in quanto attualmente il valore corrispondente è assunto secondo la normativa SIA 2032 utilizzata per studi e progetti preliminari, omogeneizzando il livello di dettaglio dei dati di input.

È stata riscontrata la stessa criticità in merito alla voce tecniche della casa. I progettisti che predispongono impianti di produzione di ener-

gia *green* e sistemi di riduzione del consumo di risorse dovrebbero poter inserire dati di input a riguardo, al fine di ottenere un risultato di OP conforme al progetto.
Infine, vi è da considerare il tema della vita utile dell'edificio. Non è possibile inserire questo dato come input. Tutti risultati ottenuti sono normalizzati annualmente senza specificare la durata del ciclo vita. Si presuppone che siano relativi ad un arco temporale di 30 anni, corrispondente alla vita utile dell'edificio specificata dal bando di concorso.

Dati di output
Per poter analizzare con maggior senso critico i risultati ottenuti sarebbe utile predisporre due grafici che riportino separatamente i dati quantitativi relativi all'*Operational Energy*, data dalla voce tecniche della casa, e all'*Embodied Energy* dei macro componenti edilizi.
In merito alla EE sarebbe utile avere una visualizzazione di risultati che permetta di analizzare l'impatto di ogni materiale potendo così effettuare delle scelte mirate e più consapevoli.

Supporto informatico e costo
Nonostante queste criticità, il software ZPF-tool si presenta rapido nella compilazione poiché i dati di input da inserirvi sono limitati, è gratuito e non necessita di un particolare supporto

informatico poiché il programma stesso è un foglio di calcolo Excel. Per tali motivi risulta essere uno strumento adatto unicamente alla fase della progettazione iniziale.
L'utilizzo di questo programma è spesso richiesto nei concorsi svizzeri, mostrando una notevole sensibilità da parte della committenza verso le tematiche ambientali. Esso rappresenta il punto di partenza per successive analisi ambientali più specifiche e una guida per i progettisti verso un design più sostenibile. Essendo gratuito non vi è la possibilità di richiedere supporto e assistenza nel caso si riscontrassero problematiche durante il suo utilizzo.

2.3.2 SimaPro

SimaPro è uno strumento usato a livello globale da molti professionisti e consulenti per raccogliere, analizzare e monitorare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi.
Grazie a questo programma si possono svolgere studi di *Life Cycle Assesstement*, calcolare il *carbon footprint* e il *water footprint* a livello di prodotto, svolgere i calcoli per conseguire la Dichiarazione ambientale di prodotto EPD, e molto altro legato all'eco-design dei prodotti, seguendo le norme ISO 14040-14044. [47]
Le banche dati caricate nel software sono molteplici ed hanno diversa provenienza: europea, statunitense, australiana, rendendo così SimaPro uno dei programmi per il calcolo dell'impatto ambientale più diffuso.

[47] SimaPro | LCA software for informed-change makers. (2022, October 21). SimaPro. https://simapro.com/

Caratterizzazione dei dati di input

Per facilitare l'inserimento dei dati di input il layout del software è strutturato in un elenco visibile sulla sinistra della schermata. L'inserimento dei dati di input è reso intuitivo dalla suddivisione in sei sezioni principali da compilare in ordine di lettura. Le sei macro categorie sono: *Wizard, Goal and scope, Inventory, Impact assessment, Interpretation, General data*.

All'interno della categoria *Goal and scope* si possono trovare le voci *Description*, in cui inserire i dati generali del progetto, e *Libraries*, che permette la scelta dei database dei materiali e l'elenco dei metodi di calcolo.
Nella sezione *Processor*, facente parte del gruppo *Inventory*, è possibile osservare i materiali e i relativi processi resi disponibili dai database. Per ognuno di essi è possibile modificare l'unità funzionale permettendo di ottenere un risultato conforme alle esigenze dell'analisi LCA.
Il *core process* di questa metodologia risiede in *Assembly*. Qui vengono definiti in una prima fase gli elementi che compongono l'intero manufatto edilizio e successivamente ad ogni elemento vengono assegnate le tipologie e le quantità di materiali che lo compongono.

Confini del sistema

Il software SimaPro può considerare l'intero ciclo di vita dei prodotti o solo alcune fasi. Questo è reso possibile dall'elevata personalizzazione dei dati di input e dalle numerose banche dati presenti.
L'unità funzionale è definita dall'utente in base alle esigenze dell'analisi.

Calcolo dell'impatto ambientale

La versione studenti 2017 di SimaPro permette di calcolare diversi impatti ambientali mediante i metodi seguenti:

- il C*umulative Energy Demand* (CED) - calcola l'energia diretta e indiretta utilizzata durante un ciclo vita;
- il IPCC 2013 GWP 100 a, analizza i fattori di cambiamento climatico in un lasso di temporale di 100 anni non includendo gli effetti indiretti delle emissioni di CO_2.
- il Cumulative Exergy Demand (CExD) - rappresenta il consumo totale di exergia di tutte le risorse richieste per creare un prodotto;
- l'Ecological footprint - considera l'impronta ecologica che individua quanti ettari di bosco, terreni da pascolo, terreni coltivabili e mari siano necessari per rinnovare le risorse utilizzate e assorbire i rifiuti generati;

- l'Ecosystem Damage Potential - definisce la probabilità e gli effetti dei danni;
- ll Greenhouse Gas Protocol (GHG) - stabilisce quadri globali standardizzati per misurare e gestire le emissioni di gas serra (GHG) da operazioni, catene del valore e azioni di mitigazione del settore pubblico e privato;
- l'LCI results - analizza i costi del ciclo vita;
- l'USEtox - caratterizza gli impatti umani ed ecotossicologici delle sostanze chimiche, includendo i parametri di destino esposizione ed effetto.

I dati in uscita si presentano in schemi ad albero che mostrano i risultati in percentuale e con le quantità espresse nell'unità di misura definita dal metodo di calcolo. È possibile selezionare il grado di dettaglio desiderato: in questo modo possono essere esclusi gli impatti meno significativi.

Workflow

Nelle pagine seguenti è stato riportato il processo di analisi LCA mediante il software SimaPro applicato al caso studio *Circular Tower*.

Tra le banche dati disponibili (Figura 117) sono state scelte quelle svizzere (*Ecoinvent*) per effettuare un confronto più pertinente possibile con il software ZPF che utilizza una parte della banca dati *KBOB*, anch'essa di origine svizzera, ma non presente nella libreria di SimaPro.

Il database *Ecoinvent* è un database LCI (*Life Cycle Inventory*) che supporta vari tipi di valutazioni di sostenibilità. È un archivio che copre una vasta gamma di settori a livello globale e regionale. I *dataset* di *Ecoinvent* contengono informazioni sul processo industriale o agricolo che modellano, misurando le risorse naturali sottratte all'ambiente, le emissioni rilasciate nell'acqua, nel suolo e nell'aria, i prodotti richiesti da altri processi (elettricità) e, naturalmente, i prodotti, co-prodotti e rifiuti prodotti. Inoltre, vengono pubblicate relazioni annuali che documentano le modifiche al database. Il *database Ecoinvent* viene aggiornato ogni anno per includere dati nuovi e aggiornati. Attualmente, l'ultima versione è *Ecoinvent* v3.9 ma quella utilizzata per il caso studio *Circular Tower* è *Ecoinvent* 3.

Una peculiarità che presenta questa banca dati è l'attribuzione di una posizione geografica ad ogni attività presente nel database, riportate utilizzando abbreviazioni accettate a livello internazionale. È inoltre presente un set di dati che indica il processo a livello globale, ovvero la produzione globale media (GLO). [48]

	Agri-footprint - economic allocation
	Agri-footprint - gross energy allocation
	Agri-footprint - mass allocation
	AusLCI System Processes
	AusLCI System Shadow Database
	AusLCI Unit Processes
	Australasian System Processes
	Australasian Unit Process LCI
	Ecoinvent 3 - allocation, default - system
√	Ecoinvent 3 - allocation, default - unit
	Ecoinvent 3 - allocation, recyded content - system
	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - unit
	Ecoinvent 3 - consequential - system
	Ecoinvent 3 - consequential - unit
	ELCD
	EU & DK Input Output Database
	Industry data 2.0
	LCA Food DK
√	Methods
√	Swiss Input Output Database
	USA Input Output Database
	USA Input Output Database System Expansion
	USLCI
	Agri-footprint - economic allocation

Figura 117: Tabella dei database utilizzati tra quelli disponibili nel software SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria.

Il *database Swiss Input Output* offre delle tabelle input-output (IOT) che forniscono una descrizione dettagliata del flusso circolare di beni e servizi di un'economia e costituiscono quindi uno strumento importante nella ricerca economica empirica e nelle analisi strutturali.

L'IOT disponibile, così come le versioni degli anni precedenti, ha un carattere sperimentale.
Ciò deriva dal fatto che, in Svizzera, mancano alcune delle fonti di dati obbligatorie per la produzione di un IOT che devono essere stimate. [49]
Tra i metodi di calcolo messi a disposizione da questa versione di SimaPro, riportati in figura 118, al fine del calcolo del caso studio *Circular Tower* sono stati utilizzati: il C*umulative Energy Demand* (CED) e il IPCC 2013 GWP 100 a.
I metodi sono stati scelti per confrontare i risultati ottenuti mediante l'utilizzo di ZPF.

[48] ecoinvent Database. (2022, October 13). Ecoinvent. https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/
[49] Office, F. S. (n.d.). Input-Output Tables. Federal Statistical Office. Retrieved November 5, 2022, from https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/statistics/national-economy/input-output.html
[50] ecoinvent Database. (2022, October 13). Ecoinvent. https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/
[51] Frischknecht, R., & Jungbluth, N. (2003). Attuazione dei metodi di valutazione dell'impatto del ciclo vitale. Rapporto finale ecoinvent 2000. Centro Svizzero per LCI.
[52] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). IPCC. https://www.ipcc.ch/

Figura 118: Tabella dei metodi di calcolo utilizzati tra quelli disponibili nel software SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria.

√	Cumulative Energy Demand
	Cumulative Exergy Demand
	Ecological footprint
	Ecosystem Damage Potential
	Greenhouse Gas Protocol
√	IPCC 2013 GWP 100a
	IPCC 2013 GWP 20a
	IPCC 2013 GWP 500a
	Selected LCI results
	Selected CI results, additional
	USEtox (consensus only)
	USEtox (recommended + interim)
	Normalization/Weightingset

CED

Il metodo per il calcolo del C*umulative Energy Demand* (CED) è basato sulla metodologia pubblicato da *Ecoinvent* versione 2.0 ed ampliato da *PRé Consultants* per le materie prime disponibili nel database di SimaPro 7. [50] [51]

IPCC GWP 100 a

IPCC 2013 è il successore del metodo IPCC 2007, sviluppato dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change*, contiene i fattori di cambiamento climatico in un lasso di temporale di 100 anni non includendo gli effetti indiretti delle emissioni di CO_2. [52]

In seguito alla definizione della metodologia di calcolo e alla selezione delle banche dati svizzere, descritte nei punti precedenti, si è proceduto con la suddivisione del manufatto edilizio in elementi, riprendendo la ripartizione proposta dal software ZPF in modo tale da poter eseguire un confronto accurato dell'impatto ambientale di ogni elemento (Figura 119). Inoltre, un ulteriore intento di questa suddivisione è quello di capire quale rapporto percentuale persiste tra i vari componenti dell'edificio in termini di emissioni ed energia utilizzata. Differentemente da ZPF, l'unità funzionale utilizzata nelle analisi tramite il software SimaPro è l'edificio stesso.

Grazie all'impiego della progettazione BIM, sono state individuate molto velocemente le quantità di materiale contenute nella *Circular Tower*.

Al fine di fare un confronto diretto con il software ZPF è stato modificato il modello 3D, escludendo gli elementi che ZPF-tool non considera nel calcolo degli impatti ambientali.

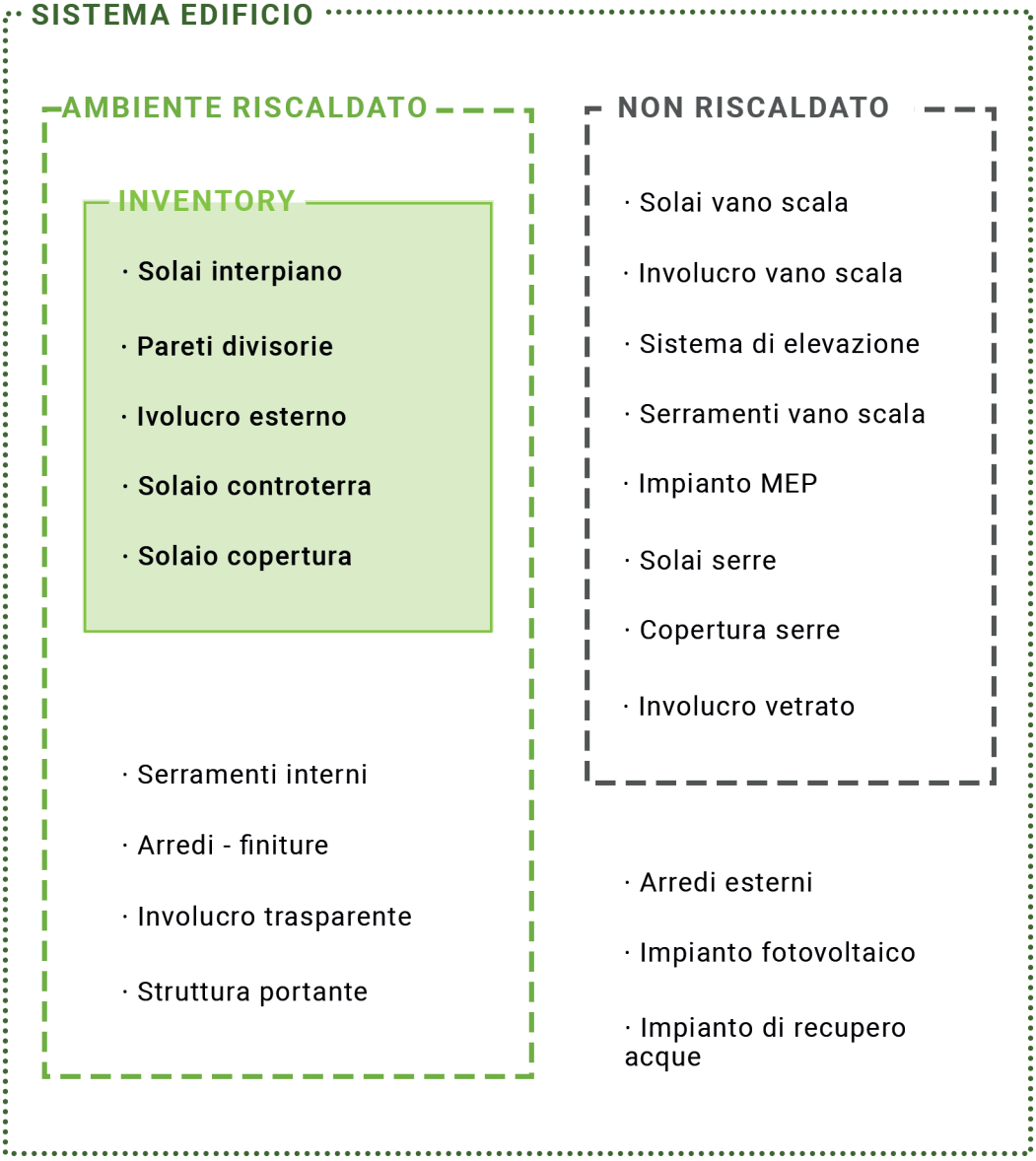


Figura 119: Confine del sistema nell'analisi LCA mediante SimaPro.

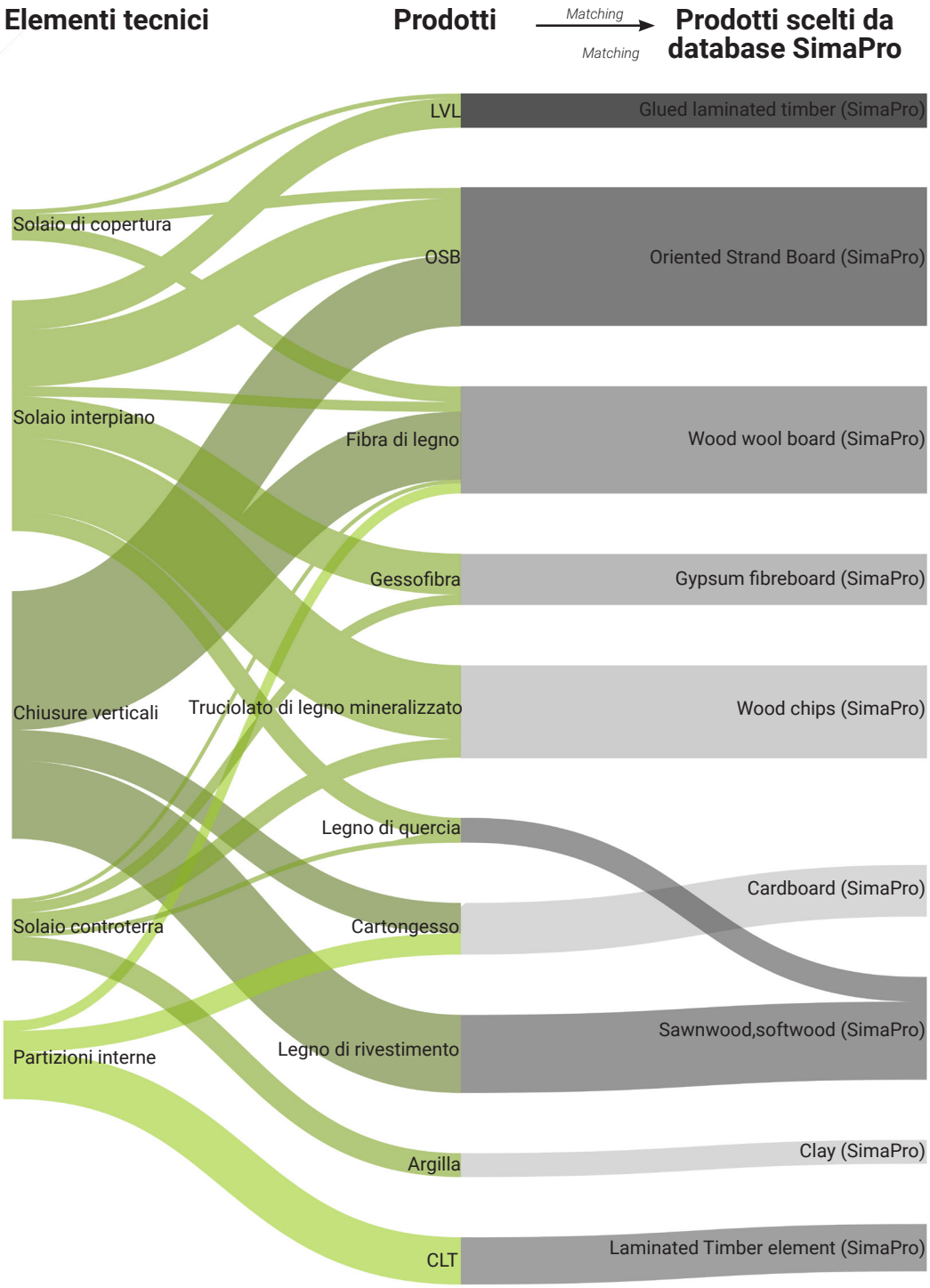
Fonte: Elaborazione propria.

Nella scheda *Assembly* sotto la voce *Product stage* in *Inventory*, per ogni elemento, ricercando nel database di SimaPro, sono stati abbinati i materiali al tipo di prodotto scelto più idoneo.
Effttuando il porcesso di inventario è stato necessario uniformare le unità funzionali per i materiali lignei in metri cubi, mentre le quantità dei restanti materiali sono state espresse in chilogrammi.

Per rappresentare graficamente il flusso dei materiali, le quantità sono state normalizzate secondo un'unica unità funzionale, ovvero la massa (kg). Il risultato ottenuto è riportato nella figura 120. È possibile osservare che tutti i materiali presi in analisi riportano una corrispondenza con quelli selezionati nella banca dati. Il flusso maggiore è rappresentato dai pannelli di OSB.
Differentemente da ZPF, sono stati inseriti i materiali dei componenti *solaio di copertura* e *solaio controterra*. Inoltre, i materiali abbinati mediante la banca dati risultano essere più inerenti alle scelte progettuali.

Figura 120: Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software online SankeyMATIC: Build a Sankey Diagram. (n.d.). https://sankeymatic.com/build/


Elementi tecnici
Prodotti
Matching
Matching
Prodotti scelti da database SimaPro
Solaio di copertura
Solaio interpiano
Chiusure verticali
Solaio controterra
Partizioni interne
LVL
OSB
Fibra di legno
Gessofibra
Truciolato di legno mineralizzato
Legno di quercia
Cartongesso
Legno di rivestimento
Argilla
CLT
Glued laminated timber (SimaPro)
Oriented Strand Board (SimaPro)
Wood wool board (SimaPro)
Gypsum fibreboard (SimaPro)
Wood chips (SimaPro)
Cardboard (SimaPro)
Sawnwood,softwood (SimaPro)
Clay (SimaPro)
Laminated Timber element (SimaPro)

Analisi dei risultati ottenuti

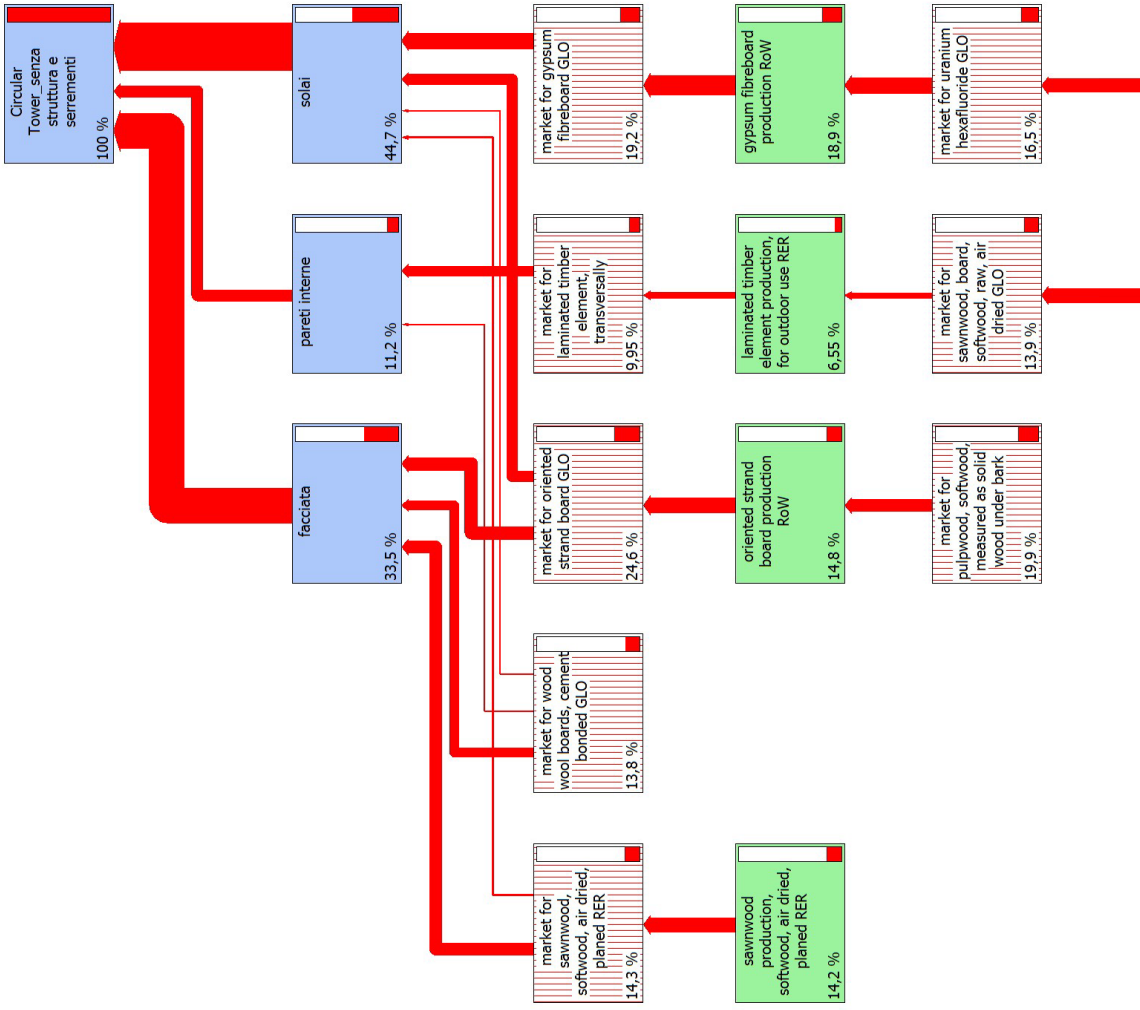
Grazie al software SimaPro è possibile eseguire un ventaglio di analisi molto ampio e, come descritto nel paragrafo precedente, al fine di effettuare un confronto con ZPF, è stato scelto di eseguire le analisi *Global Warming Potential 100 years* (GWP 100a) e *Cumulative Energy Demand* (CED).

È stato possibile effettuare l'analisi CED con la quale sono state calcolate le quantità di *Embodied Energy* generate dalla produzione dei componenti della *Circular Tower*. Differentemente dal software ZPF, secondo il metodo di calcolo CED, l'EE include al suo interno l'energia primaria generata sia da fonti rinnovabili che non rinnovabili.
I dati in uscita, visualizzabili nelle figure 121, 122, 123, 124, si presentano in diversi schemi ad albero. Dapprima è stato ottenuto uno schema che mostra i risultati in percentuale e successivamente un diagramma similare con le quantità espresse in megajoules (MJ) e chilogrammi di anidride carbonica equivalente ($kgCO_{2eq}$).

Dai risultati si evince che il macro-componente dei solai è quello che contiene più EE rispetto agli altri. Per la produzione dei materiali che compongono i solai interpiani sono impiegati 2.65E6 MJ di energia da fonte non rinnovabile,

che costituisce il 34.1% di quella utilizzata per la totalità della torre.
Grazie all'analisi del software, è possibile affermare che i processi che richiedono un dispendio di energia maggiore sono quelli legati al mercato del fibrogesso e dell'OSB.

Per concludere il confronto con ZPF è stata eseguita l'analisi relativa a 100 anni sul potenziale di riscaldamento globale secondo l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).
In questo modo è stato possibile calcolare la quantità di emissioni di anidride carbonica equivalenti generate dall'intero edificio e ha permesso di confrontare e quantificare le emissioni prodotte dai macro-elementi della *Circular Tower*.
Se confrontiamo le quantità in percentuale dei componenti dell'edificio dello schema ad albero che mostra le emissioni di CO_2, con quelli che mostrano l'EE, si può constatare che i due indici non sono necessariamente correlati.
I materiali e i relativi processi necessari per produrre gli elementi di chiusura verticali opachi contano emissioni pari a 5,54E4 kg di CO_2 equivalente. Grazie allo schema ad albero che SimaPro fornisce, è possibile comprendere che gran parte della responsabilità delle emissioni è attribuita ai processi legati ai pannelli di iso
La normalizzazione dei dati di input dei mate-


Circular Tower_senza struttura e serrementi
100 %
solai
44,7 %
pareti interne
11,2 %
facciata
33,5 %
market for gypsum fibreboard GLO
19,2 %
market for laminated timber element, transversally
9,95 %
market for oriented strand board GLO
24,6 %
market for wood wool boards, cement bonded GLO
13,8 %
market for sawnwood, softwood, air dried, planed RER
14,3 %
gypsum fibreboard production RoW
18,9 %
laminated timber element production, for outdoor use RER
6,55 %
oriented strand board production RoW
14,8 %
sawnwood production, softwood, air dried, planed RER
14,2 %
market for uranium hexafluoride GLO
16,5 %
market for sawnwood, board, softwood, raw, air dried GLO
13,9 %
market for pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark
19,9 %

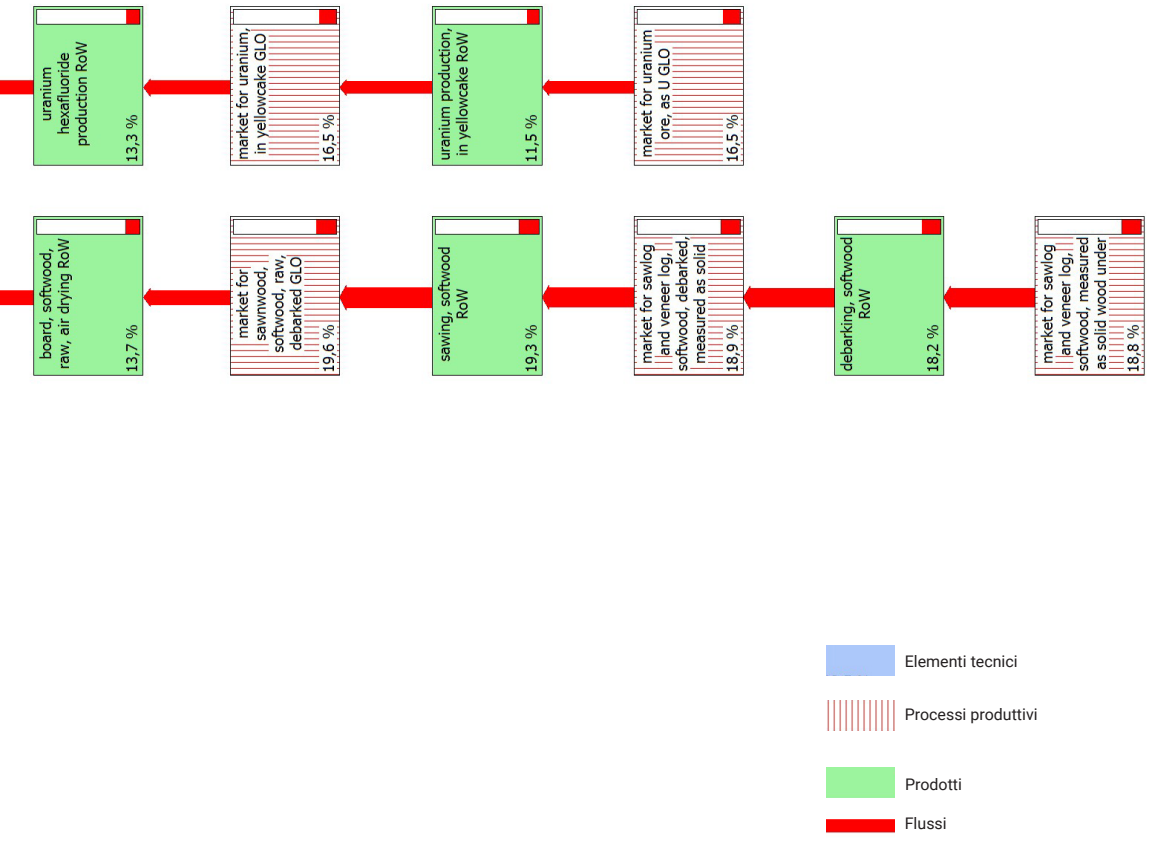
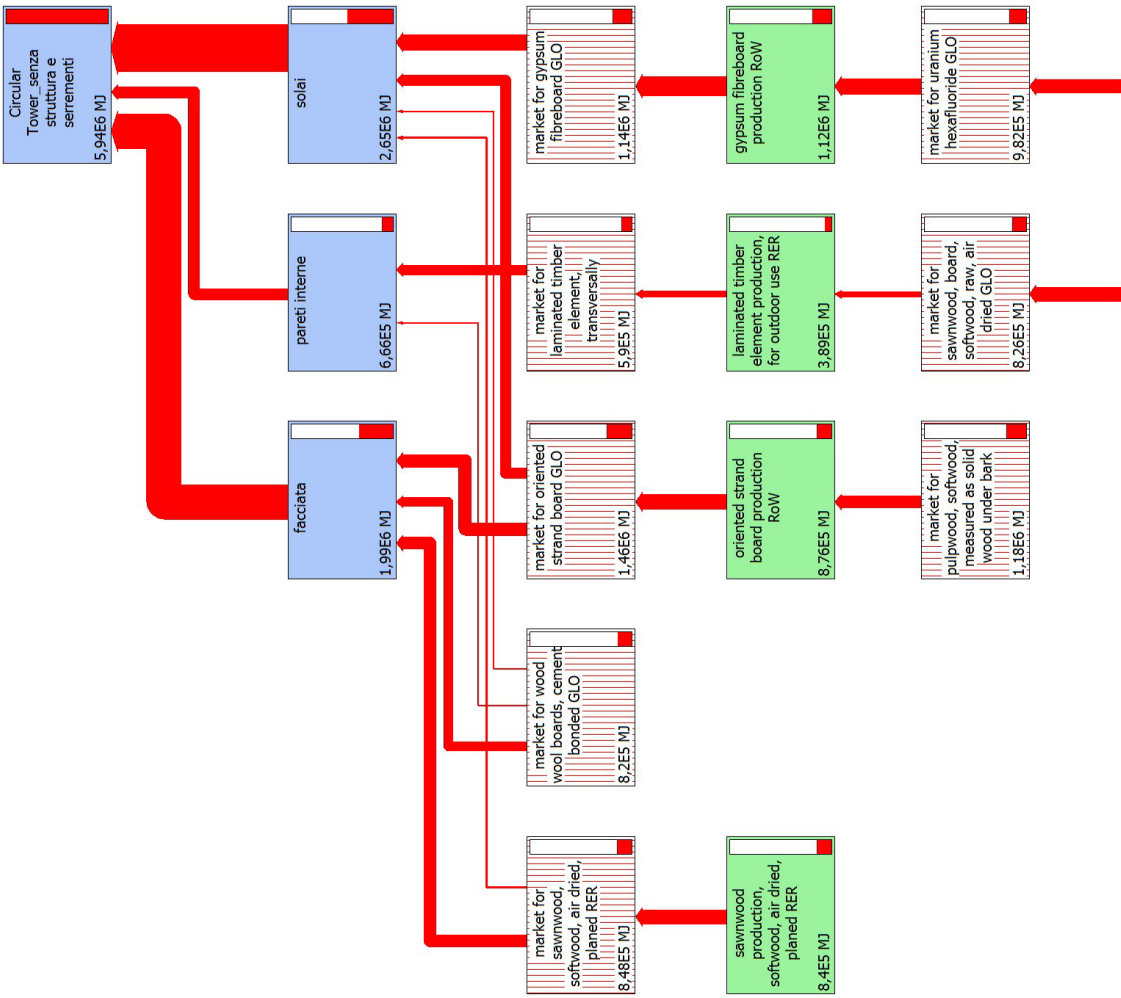


Figura 121: Diagramma ad albero del consumo in percentuale di EP dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo CED, software SimaPro. Livello di dettaglio>10%

Fonte: Software SimaPro.


Circular Tower_senza struttura e serramenti
5,94E6 MJ
solai
2,65E6 MJ
pareti interne
6,66E5 MJ
facciata
1,99E6 MJ
market for gypsum fibreboard GLO
1,14E6 MJ
market for laminated timber element, transversally
5,9E5 MJ
market for oriented strand board GLO
1,46E6 MJ
market for wood wool boards, cement bonded GLO
8,2E5 MJ
market for sawnwood, softwood, air dried, planed RER
8,48E5 MJ
gypsum fibreboard production RoW
1,12E6 MJ
laminated timber element production, for outdoor use RER
3,89E5 MJ
oriented strand board production RoW
8,76E5 MJ
sawnwood production, softwood, air dried, planed RER
8,4E5 MJ
market for uranium hexafluoride GLO
9,82E5 MJ
market for sawnwood, board, softwood, raw, air dried GLO
8,26E5 MJ
market for pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark
1,18E6 MJ

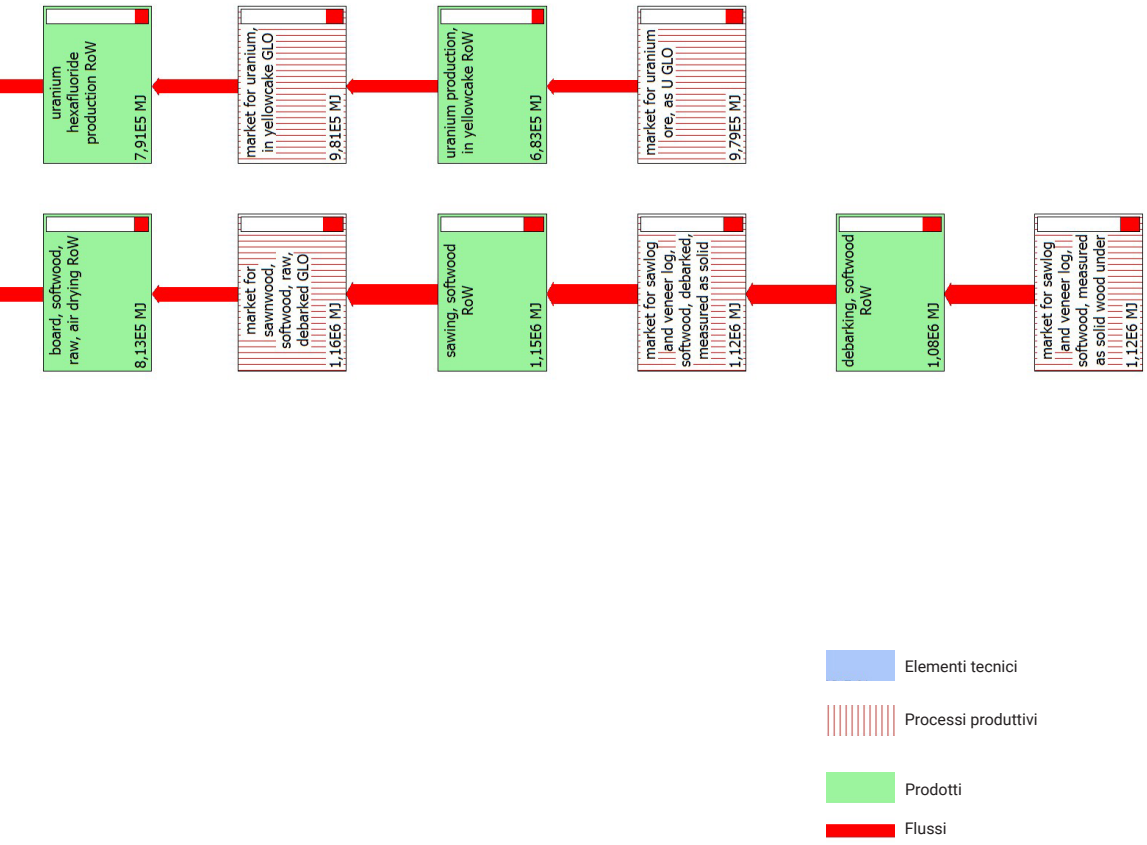
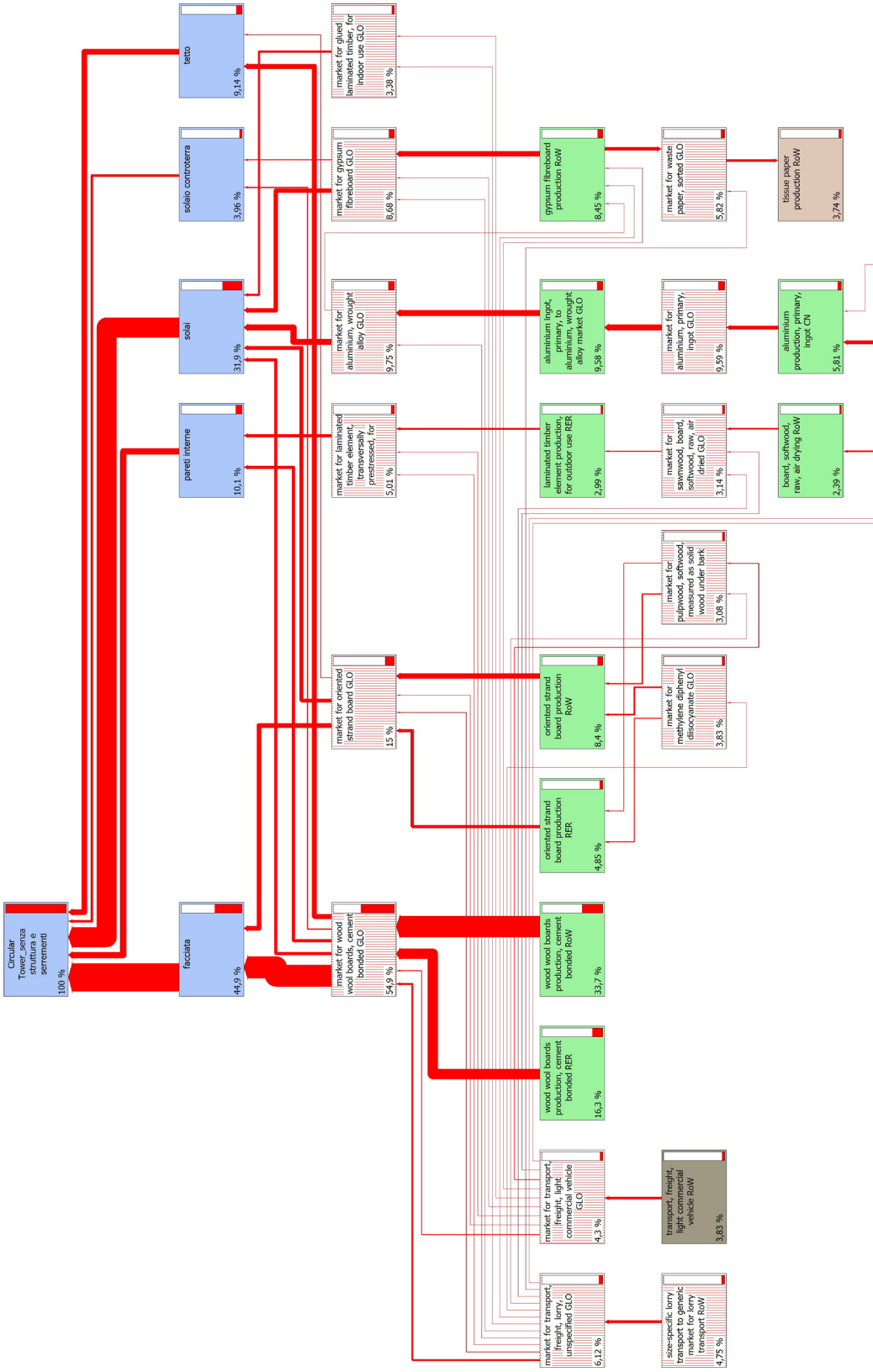
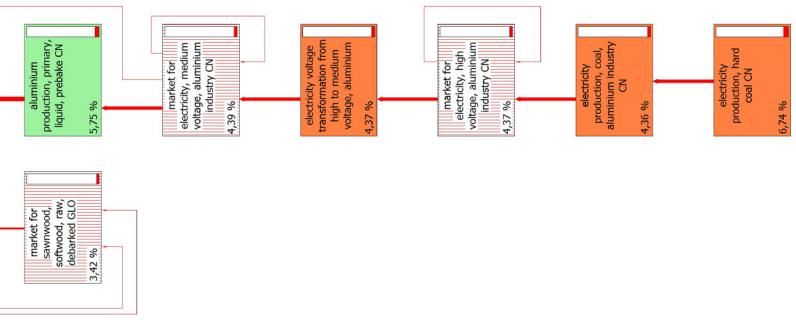


Figura 122: Diagramma ad albero del consumo in MJ di EP dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo CED, software SimaPro. Livello di dettaglio>10%.

Fonte: Software SimaPro.


Circular Tower senza struttura e serramenti
100 %
tetto
9,14 %
solaio controterra
3,96 %
solai
31,9 %
pareti interne
10,1 %
facciata
44,9 %
market for glued laminated timber, for indoor use GLO
3,38 %
market for gypsum fibreboard GLO
8,68 %
market for aluminium, wrought alloy GLO
9,75 %
market for laminated timber element, transversally prestressed, for
5,01 %
market for oriented strand board GLO
15 %
market for wood wool boards, cement bonded GLO
54,9 %
gypsum fibreboard production RoW
8,45 %
aluminium ingot, primary, to aluminium, wrought alloy market GLO
9,58 %
laminated timber element production, for outdoor use RER
2,99 %
oriented strand board production RoW
8,4 %
oriented strand board production RER
4,85 %
wood wool boards production, cement bonded RoW
33,7 %
wood wool boards production, cement bonded RER
16,3 %
market for transport, freight, light commercial vehicle GLO
4,3 %
market for transport, freight, lorry, unspecified GLO
6,12 %
market for waste paper, sorted GLO
5,82 %
market for aluminium, primary, ingot GLO
9,59 %
market for sawnwood, board, softwood, raw, air dried GLO
3,14 %
market for pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark
3,08 %
market for methylene diphenyl diisocyanate GLO
3,83 %
transport, freight, light commercial vehicle RoW
3,83 %
size-specific lorry transport to generic market for lorry transport RoW
4,75 %
tissue paper production RoW
3,74 %
aluminium production, primary, ingot CN
5,81 %
board, softwood, raw, air drying RoW
2,39 %



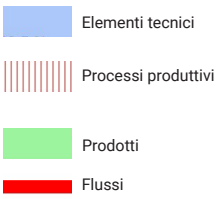
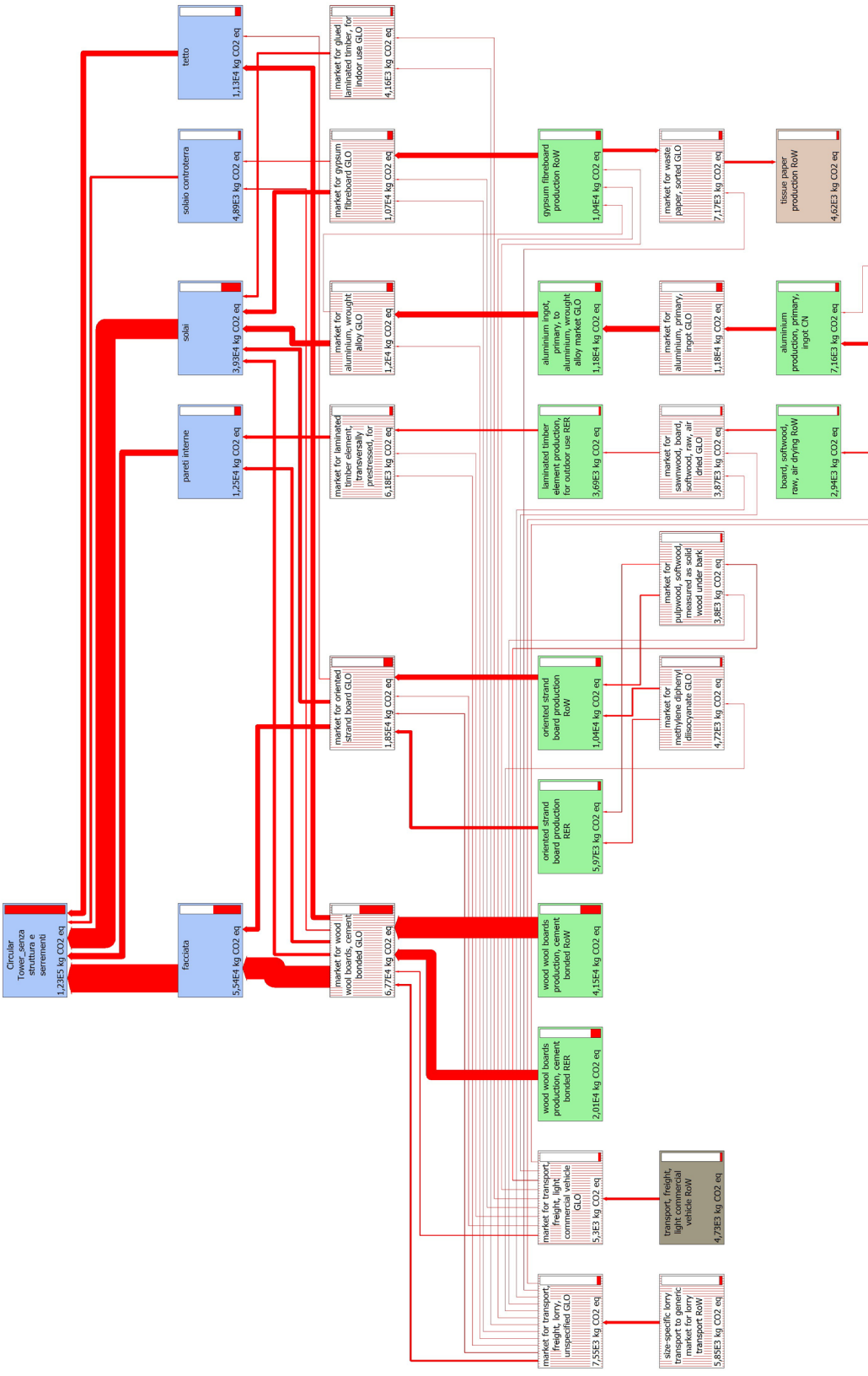


Figura 123: Diagramma ad albero delle emissioni in percentuale di CO_{2eq} dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo IPCC 100 a del 2013, software SimaPro. Livello di dettaglio>3%.

Fonte: Software SimaPro.


Circular Tower_senza struttura e serramenti
1,23E5 kg CO2 eq
tetto
1,13E4 kg CO2 eq
solaio controterra
4,89E3 kg CO2 eq
solai
3,93E4 kg CO2 eq
pareti interne
1,25E4 kg CO2 eq
facciata
5,54E4 kg CO2 eq
market for glued laminated timber, for indoor use GLO
4,16E3 kg CO2 eq
market for gypsum fibreboard GLO
1,07E4 kg CO2 eq
market for aluminium, wrought alloy GLO
1,2E4 kg CO2 eq
market for laminated timber element, transversally pressured, for outdoor use
6,18E3 kg CO2 eq
market for oriented strand board GLO
1,85E4 kg CO2 eq
market for wood wool boards, cement bonded GLO
6,77E4 kg CO2 eq
gypsum fibreboard production RoW
1,04E4 kg CO2 eq
aluminium ingot, primary, to aluminium, wrought alloy market GLO
1,18E4 kg CO2 eq
laminated timber element production, for outdoor use RER
3,69E3 kg CO2 eq
oriented strand board production RoW
1,04E4 kg CO2 eq
oriented strand board production RER
5,97E3 kg CO2 eq
wood wool boards production, cement bonded RoW
4,15E4 kg CO2 eq
wood wool boards production, cement bonded RER
2,01E4 kg CO2 eq
market for transport, freight, light commercial vehicle GLO
5,3E3 kg CO2 eq
market for transport, freight, lorry, unspecified GLO
7,55E3 kg CO2 eq
market for waste paper, sorted GLO
7,17E3 kg CO2 eq
market for aluminium, primary, ingot GLO
1,18E4 kg CO2 eq
market for sawnwood, board, softwood, raw, air dried GLO
3,87E3 kg CO2 eq
market for pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark
3,8E3 kg CO2 eq
market for methylene diphenyl diisocyanate GLO
4,72E3 kg CO2 eq
transport, freight, light commercial vehicle RoW
4,73E3 kg CO2 eq
size-specific lorry, transport to generic market for lorry, transport RoW
5,85E3 kg CO2 eq
tissue paper production RoW
4,62E3 kg CO2 eq
aluminium production, primary, ingot, CN
7,16E3 kg CO2 eq
board, softwood, raw, air drying RoW
2,94E3 kg CO2 eq

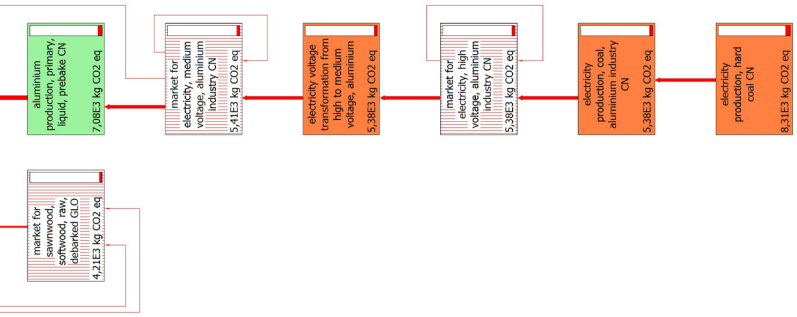


Figura 124: Diagramma ad albero delle emissioni in kg di CO_{2eq} dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo IPCC 100 a del 2013, software SimaPro. Livello di dettaglio>3%.

Fonte: Software SimaPro.

La figura 125 riporta in modo riassuntivo i dati di input inseriti nel software SimaPro. Sono inoltre state segnalate informazioni come: l'unità funzionale, il confine del sistema, i risultati rielaborati ottenuti dal calcolo.
Questa tipologia di immagine è stata prodotta per tutti e tre i programmi al fine di semplificare la lettura e il confronto.

Figura 125: Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria.

UNITÀ FUNZIONALE : m^2 DI SUPERFICIE RISCALDATA

CONFINE DEL SISTEMA : A1-A3

GWP_{tot}: 1,59 $kgCO_{2eq}/m^2/a$

$EP_{nr,tot}$: 2,24 $kWh_{oil}/m^2/a$

SimaPro

SOLAI DI COPERTURA

Dati di input

Membrana impermeabilizzante:	
Plastic membrane	*19,9kg*
OSB:	
Oriented Strand Board	*4,8m³*
Fibra di lengo:	
Wood wool board	*34,5kg*

Dati di output

GWP:	0,145 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	0,092 $kWh_{oil}/m^2/a$

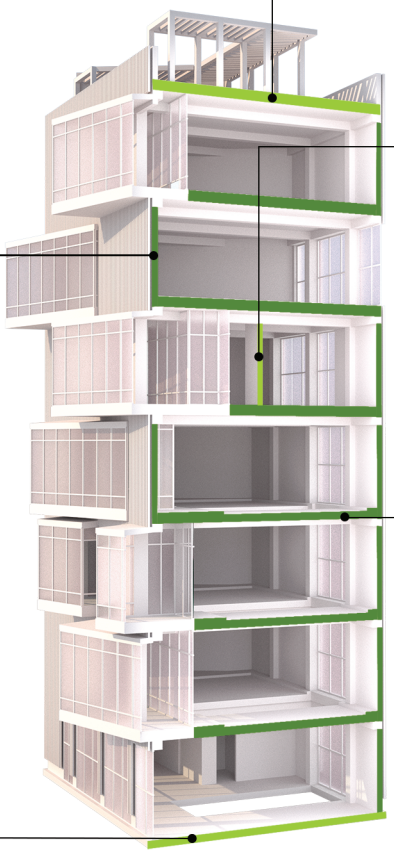
CHIUSURE VERTICALI

Dati di input

OSB:	
Oriented Strand Board	*31,8m³*
Membrana impermeabilizzante:	
Plastic membrane	*265,8kg*
Fibra di legno:	
Insulation, cellulose fibre	*151,7m³*
Cartongesso:	
Cardboard	*8235kg*
Legno di rivestimento:	
Sawnwood	*44,6m³*

Dati di output

GWP:	0,712 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	0,782 $kWh_{oil}/m^2/a$



PARTIZIONI INTERNE

Dati di input

Fibra di legno:	
Wood wool board	*22,0m³*
Cartongesso:	
Cardboard	*5649kg*
CLT:	
Laminated Timber element	*27,0m³*

Dati di output

GWP:	0,161 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	0,262 $kWh_{oil}/m^2/a$

SOLAI CONTROTERRA

Dati di input

Membrana impermeabilizzante:	
Plastic membrane	*20,8kg*
Fibra di legno:	
Wood wool board	*8,3m³*
Gessofibra:	
Gypsum fibreboard	*2780kg*
Legno mineralizzato:	
Wood chips	*5004kg*
Legno di quercia:	
Sawnwood	*1,9m³*
Argilla:	
Clay	*6394kg*

Dati di output

GWP:	0,063 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	0,154 $kWh_{oil}/m^2/a$

SOLAI INTERPIANO

Dati di input

LVL:	
Glue laminated timber	*16,5 m³*
OSB:	
Oriented Strand Board	*25,3m³*
Legno mineralizzato:	
Wood chips	*19800kg*
Legno di quercia:	
Sawnwood	*7,6m³*
Fibra di legno:	
Wood wool board	*22,0m³*
Gessofibra:	
Gypsum fibreboard	*11011kg*

Dati di output

GWP:	0,505 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	1,041 $kWh_{oil}/m^2/a$

Elaborazione dei risultati

riali in chilogrammi ha permesso di rapportare le quantità di materiali con i relativi output di CO_{2eq} emessa e di Energia Primaria impiegata.
La figura 126 dimostra infatti che le emissioni derivanti dalla produzione dei pannelli in fibra di legno sono giustificate dalle elevate quantità impiegate del prodotto.
Il tetto, le partizioni interne e il solaio controterra hanno un impatto minimo sul totale dell'edificio sia per quanto riguarda l'uso di EP che per la quantità di emissioni di CO_2 equivalenti poiché la superficie coinvolta è nettamente inferiore (Figura 127).

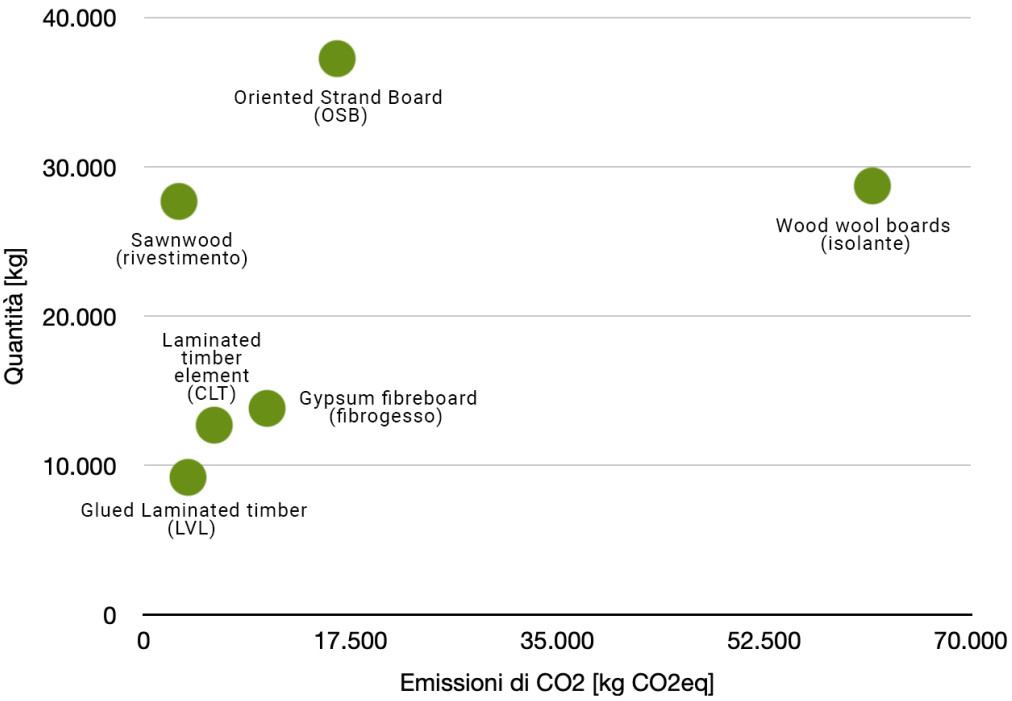
Figura 126: Diagramma che mostra le emissioni di CO_{2eq} dei materiali in rapporto alla loro quantità in kg.

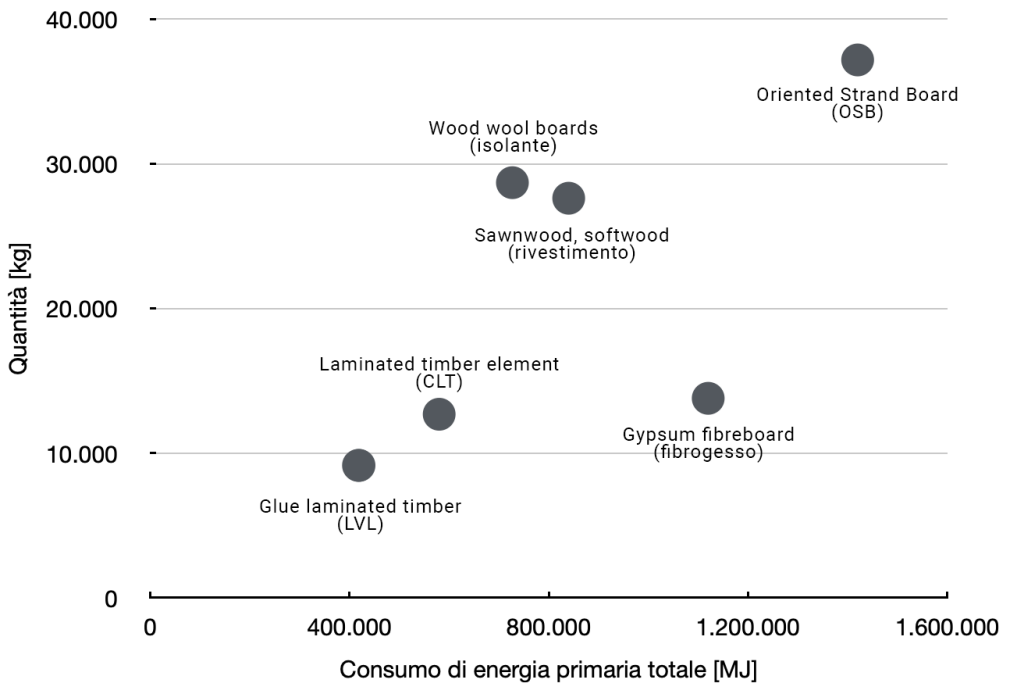
Fonte: Elaborazione propria dei dati ottenuti mediante il software SimaPro.

È stata effettuata un'ulteriore normalizzazione rispetto alla superficie riscaldata di 780 m^2 (Figure 128, 129, 130, 131) al fine di effettuare successivamente un confronto dei risultati ottenuti con i diversi software impiegati per l'analisi LCA.
Il metodo di calcolo IPCC è esteso su un arco temporale di 100 anni, perciò questo dato ha richiesto una successiva rielaborazione, riportando il risultato in un dato annuo.
Nelle pagine seguenti sono riportati i valori normalizzati graficizzati mediante rappresentazioni a torta e a barre per poter essere maggiormente confrontabili con i dati di output degli altri software.

Figura 127: Diagramma che mostra il consumo di EP impiegata per la realizzazione dei materiali in rapporto alla loro quantità in kg.

Fonte: Elaborazione propria dei dati ottenuti mediante il software SimaPro.


40.000
30.000
20.000
10.000
0
Quantità [kg]
Oriented Strand Board (OSB)
Sawnwood (rivestimento)
Wood wool boards (isolante)
Laminated timber element (CLT)
Gypsum fibreboard (fibrogesso)
Glued Laminated timber (LVL)
0
17.500
35.000
52.500
70.000
Emissioni di CO2 [kg CO2eq]


40.000
30.000
20.000
10.000
0
Quantità [kg]
Oriented Strand Board (OSB)
Wood wool boards (isolante)
Sawnwood, softwood (rivestimento)
Laminated timber element (CLT)
Gypsum fibreboard (fibrogesso)
Glue laminated timber (LVL)
0
400.000
800.000
1.200.000
1.600.000
Consumo di energia primaria totale [MJ]

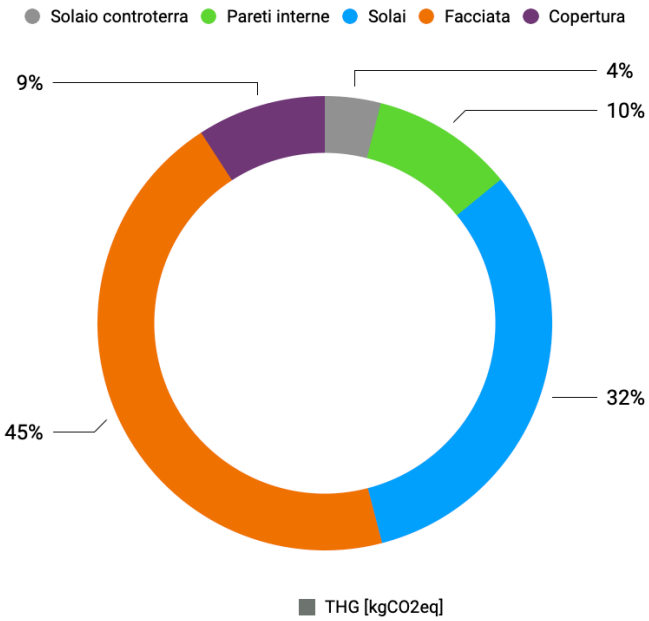


Figura 128: Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO_{2eq} della Circular Tower. SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software SimaPro.

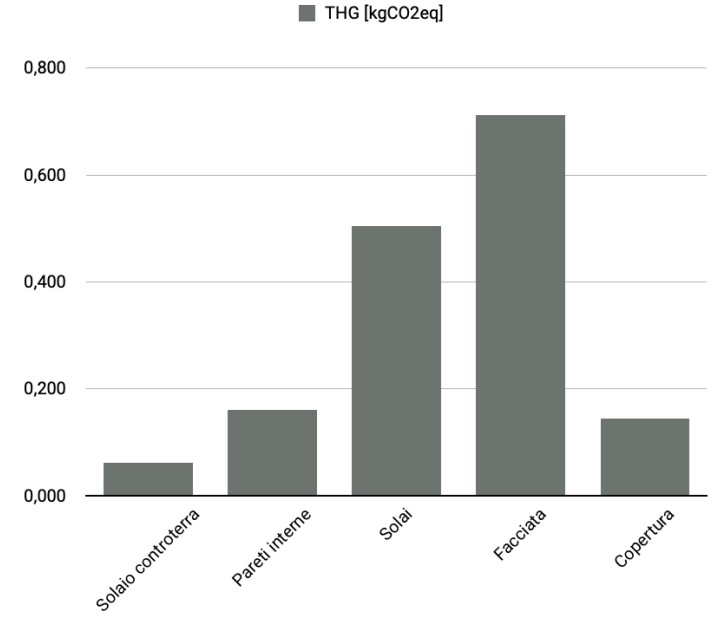


Figura 129: Grafico a barre dei risultati sulle emissioni di CO_{2eq} della Circular Tower. SimaPro

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software SimaPro.

Figura 130: Grafico a torta dei risultati del consumo di EP. SimaPro

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software SimaPro.

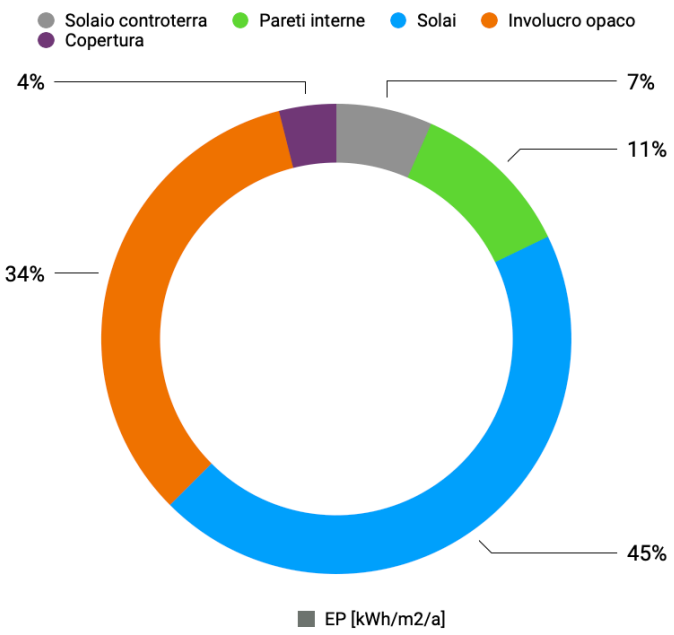
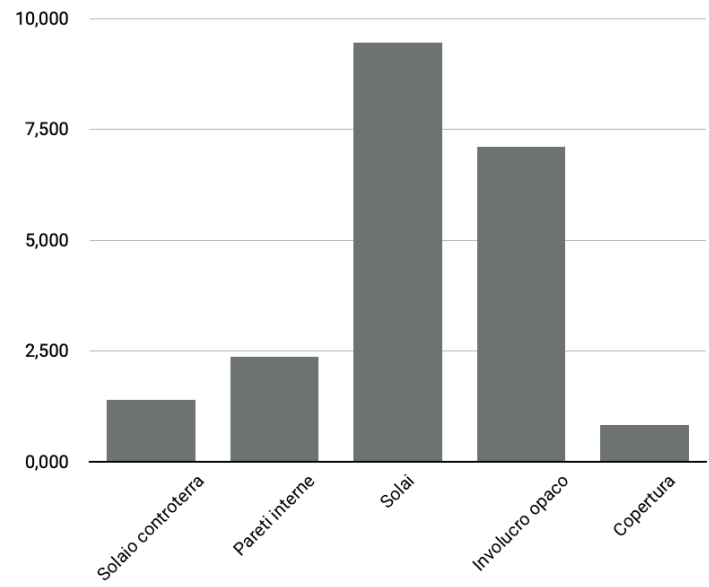


Figura 131: Grafico a barre dei risultati del consumo di EP. SimaPro

Fonte: Elaborazione propria basata sui dati ottenuti con il software SimaPro.



Potenzialità e limiti del software

Fase di utilizzo

Dopo il suo utilizzo è possibile affermare che il software SimaPro sia adatto per effettuare studi e analisi di un edificio sia in una fase di *concept design*, sia a una fase di progettazione in cui il grado di dettaglio è elevato. Lo sviluppo del modello BIM dettagliato, utilizzato per la produzione degli elaborati del concorso di idee indetto da Teclab, avrebbe permesso uno studio più accurato considerando un sistema più ampio. Al fine del confronto sono stati esclusi alcuni dati che ZPF non permetteva di considerare.

Database

Il software, a differenza di ZPF, non è *site specific* poiché permette la scelta di banche dati globali ed è sviluppato in lingua inglese.

Le banche dati integrate, anche nella versione 2017 del programma, sono estese ed è stato possibile ritrovare tutti i materiali costituenti la Circular Tower. Oltre alla loro estensione è importante citarne la completezza. Infatti, è possibile produrre delle analisi LCA decidendo diversi confini del sistema e ottenere dei risultati molto dettagliati, i quali riportano i dati relativi a ogni fase del processo produttivo di ciascun materiale.

Limiti nel calcolo

Si comprende che questo software non sia pensato principalmente per il settore edilizio a causa della mancanza di una diretta interoperabilità con i software di progettazione BIM. Nonostante questo, al fine di eseguire le analisi sul caso studio della Circular Tower, non sono stati riscontrati particolari ostacoli nel calcolo delle quantità dei materiali grazie all'utilizzo, in modo parallelo, del software BIM Revit. Si comprende però che la definizione della quantità di materiali potrebbe risultare macchinosa, ripetitiva e lenta nel caso in cui si facesse uso di software di modellazione tradizionali.

Dati di input

L'utilizzo per il settore edilizio è permesso dalla flessibilità del software nell'inserimento dei dati di input, permettendo la personalizzazione del sistema e offrendo la possibilità di non escludere forzatamente delle parti da esso.

Dati di output

In merito ai dati di output è da segnalare che i risultati sono riportabili con diverse scale di dettaglio, varie tipologie grafiche e formati disponibili. Il diagramma ad albero selezionato per il caso studio permette di identificare gli impatti generati dalla realizzazione di ogni componente, esprimendo l'onerosità ambientale di ogni processo.

Supporto informatico e costo

Alcuni aspetti critici riguardano l'onerosità della licenza e la necessità di possedere un supporto informatico adeguato che supporti l'installazione del programma.

2.3.3 One Click LCA

Per eseguire un secondo e ultimo confronto tra i dati di emissioni di CO_{2eq} e di consumo di energia primaria ottenuti dal programma ZPF è stato scelto il software OneClick LCA.
I motivi che hanno guidato la scelta del software sono diversi. La caratteristica fondamentale di OneClick LCA è la sua specifica applicazione per le valutazioni del carbonio e per le certificazioni di bioedilizia.
Questo programma grazie all'integrabilità con i più comuni software BIM, come Revit, e all'interfaccia web-based è facilmente accessibile e costantemente aggiornato.
Le sue caratteristiche appena descritte, insieme all'ampio database globale di materiali che offre, lo rendono un software utilizzato da ingegneri e architetti in ambito professionale.
É possibile accedere al software di calcolo direttamente dal modello 3D conservando le informazioni utili per l'analisi LCA.

Caratterizzazione dei dati di input

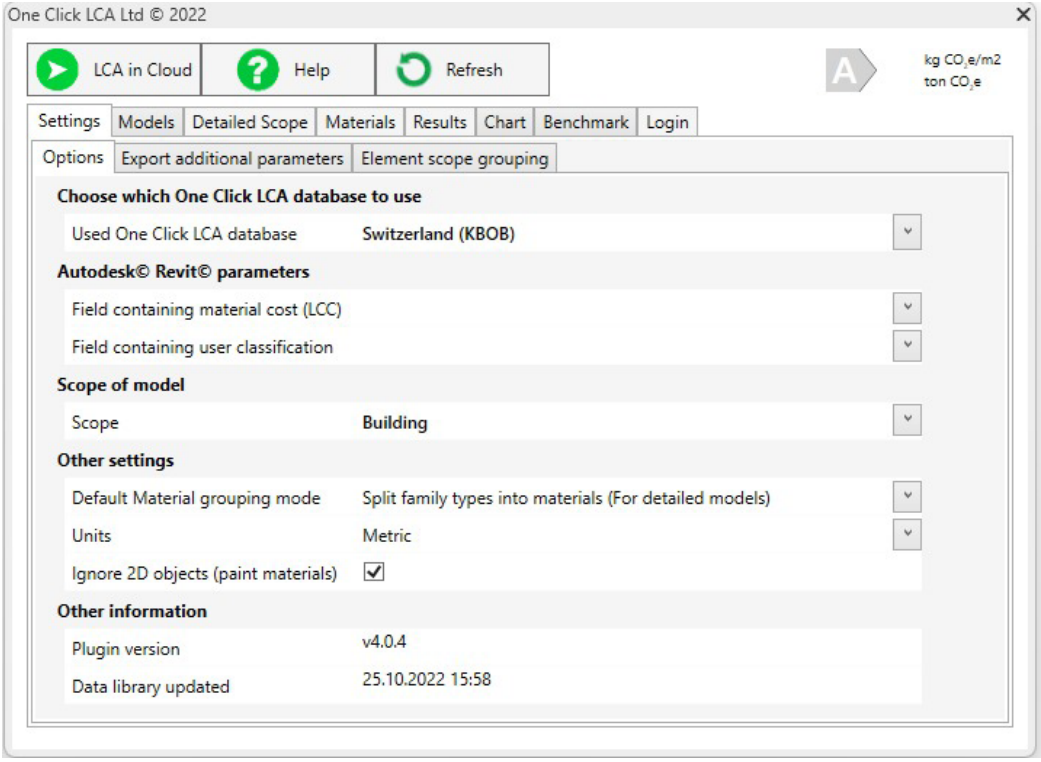
La prima procedura di inserimento dei dati di input è eseguita sulla pagina web del software mediante l'accesso al profilo personale a cui è

connessa la licenza.
Il primo *step* richiede la compilazione delle informazioni generali legate all'inquadramento dell'edificio tra cui il suo indirizzo, la tipologia di utilizzo prevalente e la superficie lorda.

Successivamente, una parte della compilazione dei dati di input deve essere effettuata sul software di modellazione tramite l'interfaccia del plug-in. Questa modalità operativa permette di creare delle varianti del modello 3D principale, confrontabili nello stesso "progetto" precedentemente registrato online, consentendo di effettuare delle scelte consapevoli dei materiali in termini di impatto ambientale.

Nella sezione *Options*, la versione *trial* di One-Click LCA dà spazio alla scelta della tipologia di calcolo per la valutazione di impatto ambientale correlata ai vari database.
È necessario scegliere il grado di dettaglio delle informazioni che si desidera inserire. L'opzione che consente una maggiore precisione è "*split family types into materials*". Così facendo i singoli materiali che compongono i pacchetti vengono separati e possono singolarmente essere abbinabili a quelli delle banche dati del software. Bisogna selezionare, grazie a un menù a discesa, l'ambito dell'analisi, ovvero se viene effettuato per l'intero edificio, per la parte impiantistica o entrambi.

È possibile selezionare ulteriori parametri aggiuntivi da esportare come: le note chiave, il nome dei produttori, i codici di assemblaggio, il tipo di certificazione, il costo e altri.
Ad ogni famiglia del programma BIM è attribuita una categoria. Prima di passare alla scheda successiva, si può controllare se le famiglie presenti nel file Revit corrispondano allo scopo del calcolo e, in caso si riscontrassero delle anomalie, è possibile modificare la corrispondenza.
La sezione *models* si presta alla scelta degli elementi del modello tridimensionale che si vogliono importare, al fine del calcolo.
OneClick LCA permette di importare i componenti presenti nella vista attiva di Revit (ovvero il modello principale) oppure solo gli elementi selezionati. Se si dovesse svolgere questo tipo di analisi su un progetto che comprende una parte di edificato esistente, sarebbe possibile scegliere se importare gli elementi preesistenti, quelli di nuova costruzione o di entrambi.
È possibile cambiare, singolarmente, per ogni famiglia le unità di misura attribuite e scegliere se scindere il pacchetto nei materiali che lo compongono (*split*) oppure se considerarlo come unico componente. Come suggerito dal plug-in, la compilazione della scheda *Detailed scope* è facoltativo. Inoltre, in questa fase è possibile escludere le famiglie superflue non necessarie al fine del calcolo.


One Click LCA Ltd © 2022
LCA in Cloud
Help
Refresh
A
kg CO2e/m2
ton CO2e
Settings
Models
Detailed Scope
Materials
Results
Chart
Benchmark
Login
Options
Export additional parameters
Element scope grouping
Choose which One Click LCA database to use
Used One Click LCA database
Switzerland (KBOB)
Autodesk© Revit© parameters
Field containing material cost (LCC)
Field containing user classification
Scope of model
Scope
Building
Other settings
Default Material grouping mode
Split family types into materials (For detailed models)
Units
Metric
Ignore 2D objects (paint materials)
Other information
Plugin version
v4.0.4
Data library updated
25.10.2022 15:58

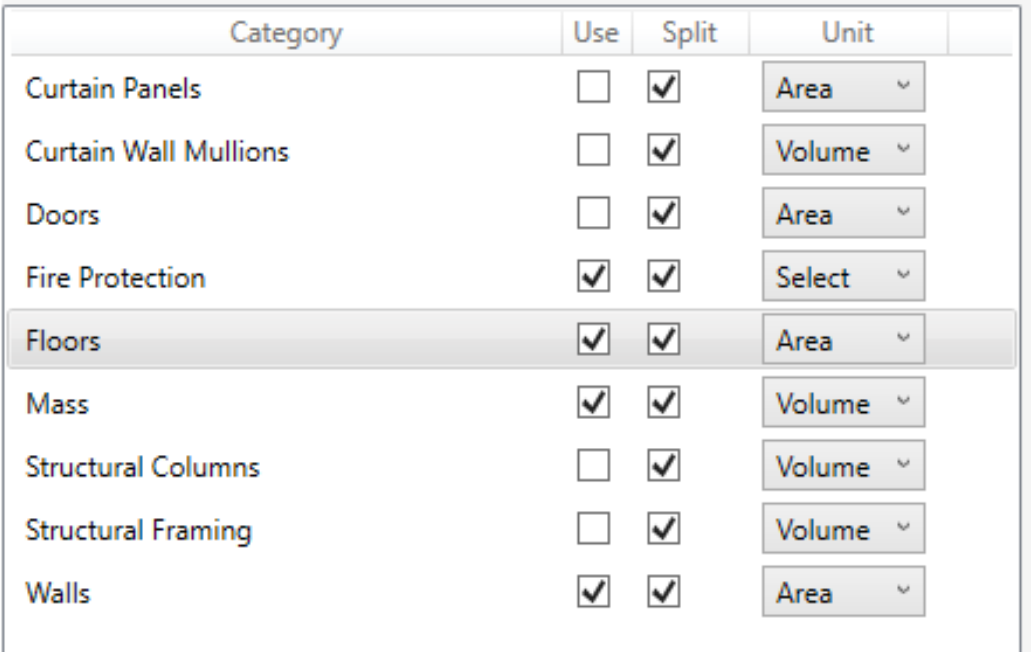

Category
Use
Split
Unit
Curtain Panels
Area
Curtain Wall Mullions
Volume
Doors
Area
Fire Protection
Select
Floors
Area
Mass
Volume
Structural Columns
Volume
Structural Framing
Volume
Walls
Area

Figura 132: Schermata acquisita della sezione "settings" di OneClick LCA.

Fonte: OneClick LCA.

Nella schermata *Materials* avviene l'abbinamento dei materiali del database a quelli del modello o delle singole famiglie, facilitato dalla ricerca mediante l'utilizzo di filtri come: categoria di materiale, tipo e regione del database, unità o attraverso il nome.

Dopo l'inserimento dei materiali, è necessario proseguire sulla schermata online, accessibile mediante il comando *LCA in cloud*, in cui si può:

- Scegliere il progetto, creato online nella prima fase;
- Scegliere il modello, vi è la possibilità di aggiungere o sovrascrivere i dati se il modello è già esistente;
- Scegliere lo strumento adeguato per l'analisi, è stato selezionato *LCA per Graue Energie,* di matrice svizzera.

Avendo selezionato lo voce *new design* è stato Il programma consente di eliminare o escludere i materiali presenti con una quantità in percentuale inferiore al 1% o allo 0,1%.

Figura 133: Schermata acquisita dalla sezione "Detailed scope" di OneClick LCA che mostra le famiglie prese in analisi.

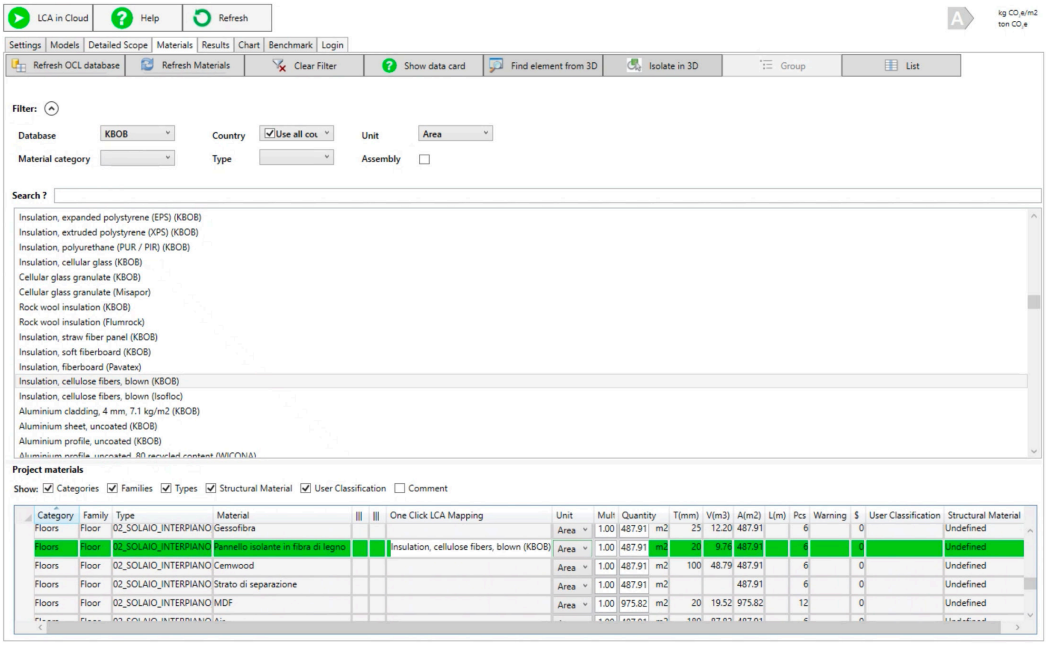
Fonte: OneClick LCA.

Confini del sistema

Il programma OneClick LCA effettua l'analisi nelle seguenti fasi del ciclo vita: A1-A2-A3, B4-B5, C1-C2-C3-C4. I risultati prodotti vengono suddivisi rispettando le designazioni dei moduli standardizzate.
L'unità funzionale richiesta è il metro quadro.

Calcolo dell'impatto ambientale

OneClick LCA permette di elaborare delle analisi in merito al costo del ciclo vita (LCI), all'*Embodied Carbon* e alla sua ottimizzazione, all'EP ed è inoltre possibile sviluppare EPD di prodotto.



Workflow

La versione di OneClick LCA utilizzata è trial 0.8.1 disponibile per 14 giorni.

Nella fase iniziale di compilazione dei dati, sulla pagina web, è stata scelta la licenza *For Switzerland: Trial for Graue* per poter accedere ai dati relativi all'ubicazione del progetto.
Inoltre, in questa fase, viene richiesto l'inserimento del dato della superficie lorda del volume, corrispondente all'unità funzionale, e per poter successivamente compiere un confronto ottimale con gli altri software di analisi è stato inserito il dato relativo alla superficie riscaldata della Circular Tower di 780m^2.
Una volta terminato l'inserimento dei dati di inquadramento è stato creato il progetto sulla pagina web.

La realizzazione di un nuovo progetto comporta l'indicazione di altre informazioni in merito al nome, alla fase del processo di costruzione, al tipo di progetto e al tipo di struttura.
La fase del processo di costruzione è stata definita come *modello sviluppato*.
La voce scelta, facendo riferimento alla struttura, è *Non determinata* poiché non si intende inserire alcuna tipologia di struttura al fine di confrontare i risultati finali con quelli ottenuti

Figura 134: Schermata acquisita dal plug-in di OneClick LCA che mostra la sezione "Materials".

Fonte: OneClick LCA

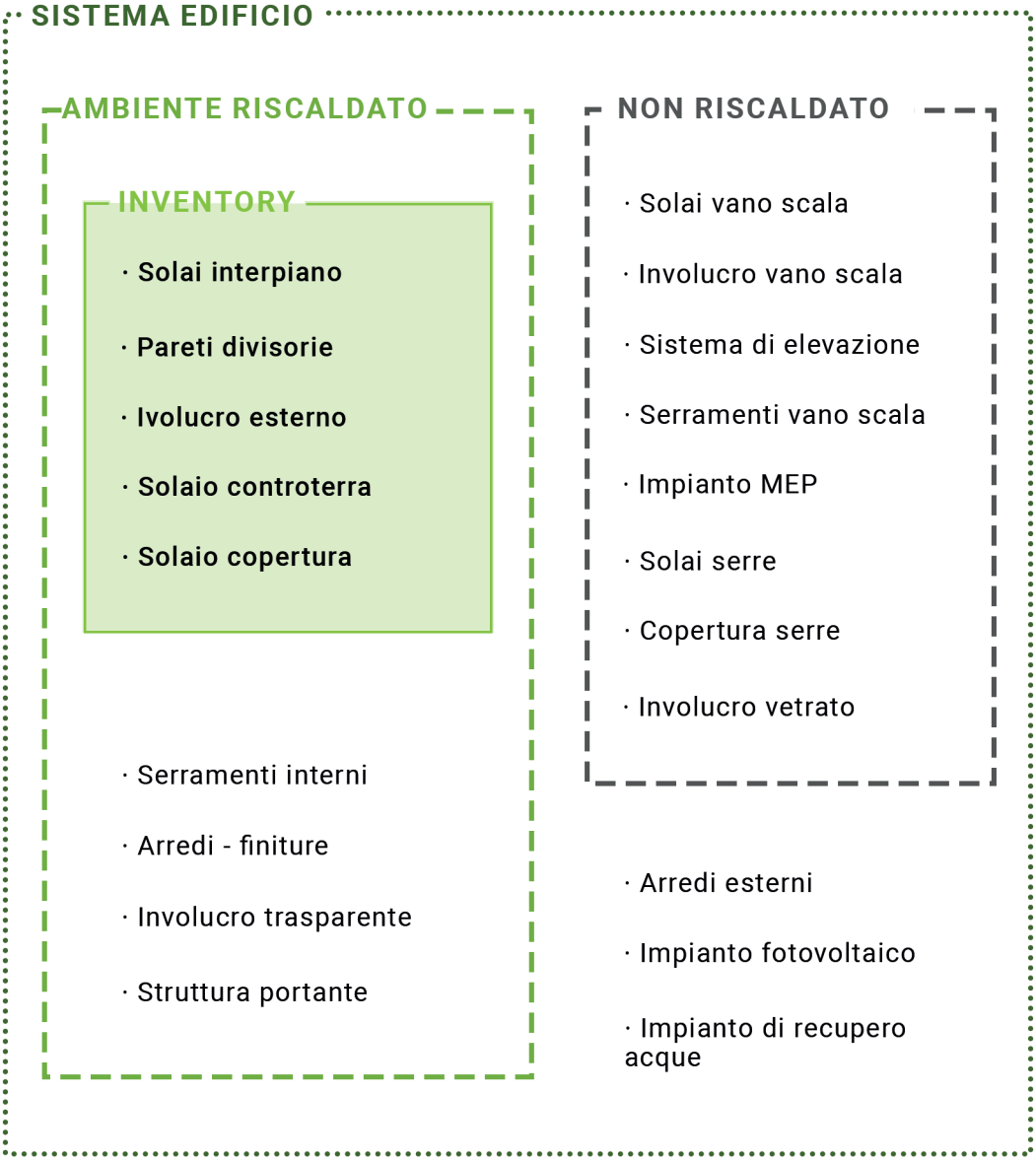


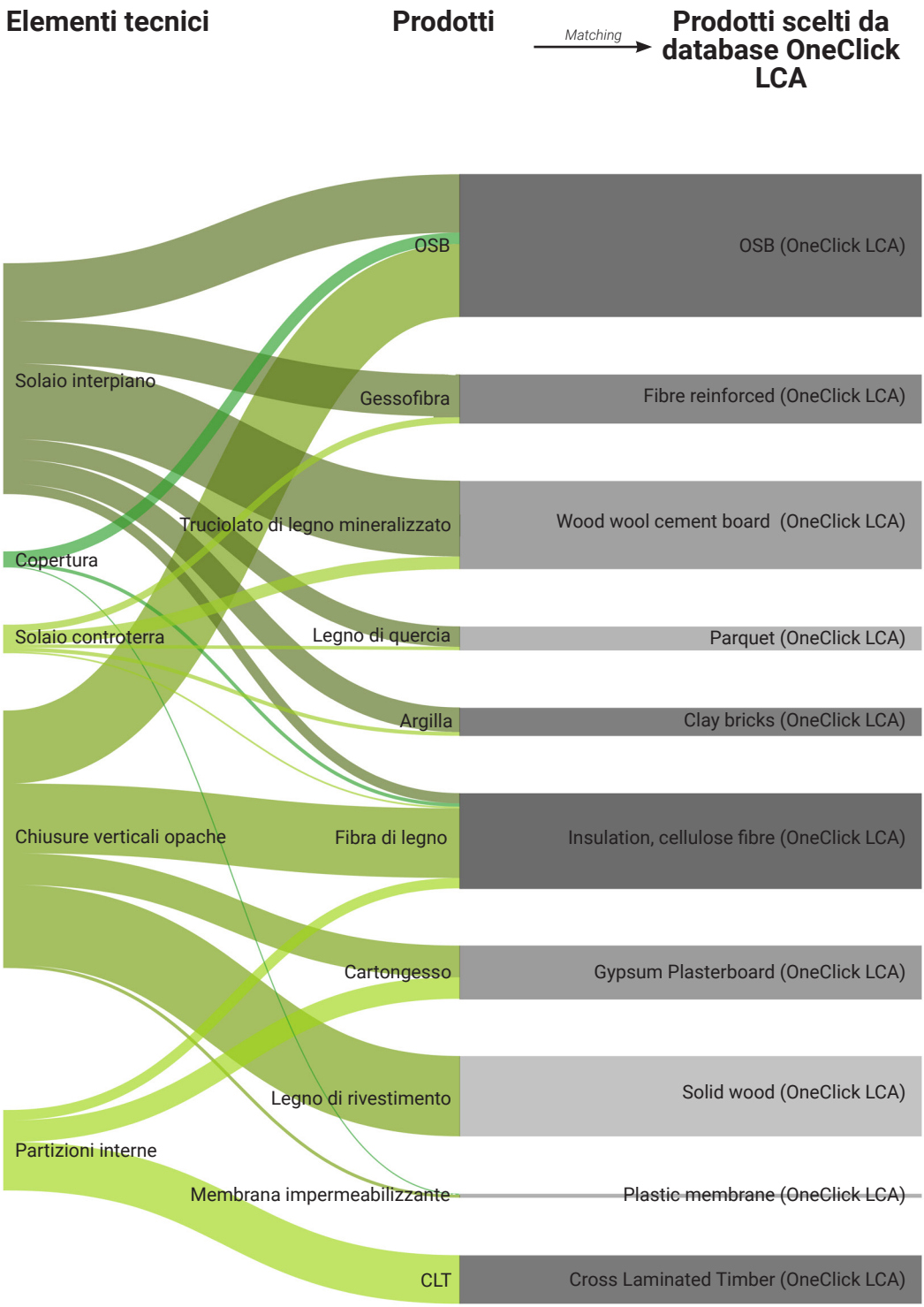
Figura 135: Confine del sistema nell'analisi LCA mediante SimaPro.

Fonte: Elaborazione propria.

mediante ZPF-tool.
La tipologia di utilizzo dell'edificio segnalata è quella per *edifici scolastici* poiché le funzioni che ospita la Circular Tower tra cui ricerca, mostre ed eventi effettuano un consumo assimilabile agli edifici scolastici.

Tramite l'interfaccia del plug-in è stata selezionata la funzione "split family types into materials" e lo scopo del calcolo "Building". È stato verificato che il modello BIM riportasse unicamente le componenti scelte per l'analisi (Figura 133).
Nella sezione Materials è stato effettuato l'abbinamento tra i materiali scelti per il progetto e quelli disponibili nel database (Figura 134). Per il caso studio è stato selezionato il *Switzerland (KBOB)*.

Le quantità di materiali normalizzate in kg calcolate per ZPF e SimaPro sono state nuovamente impiegate nella realizzazione di un diagramma Sankey che rappresenta graficamente il flusso dei materiali, nella figura 136.
Tutti i materiali presi in analisi riportano una corrispondenza con quelli selezionati nella banca dati svizzera KBOB. A differenza del caso di ZPF, il database KBOB collegato al software OneClick LCA è completo.


Elementi tecnici
Prodotti
Matching
Prodotti scelti da database OneClick LCA
Solaio interpiano
Copertura
Solaio controterra
Chiusure verticali opache
Partizioni interne
OSB
Gessofibra
Truciolato di legno mineralizzato
Legno di quercia
Argilla
Fibra di legno
Cartongesso
Legno di rivestimento
Membrana impermeabilizzante
CLT
OSB (OneClick LCA)
Fibre reinforced (OneClick LCA)
Wood wool cement board (OneClick LCA)
Parquet (OneClick LCA)
Clay bricks (OneClick LCA)
Insulation, cellulose fibre (OneClick LCA)
Gypsum Plasterboard (OneClick LCA)
Solid wood (OneClick LCA)
Plastic membrane (OneClick LCA)
Cross Laminated Timber (OneClick LCA)

Analisi dei risultati ottenuti

Figura 136: Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria mediante il software online SankeyMATIC: Build a Sankey Diagram. (n.d.). https://sankeymatic.com/build/

Il programma OneClick LCA fornisce, attraverso una tabella, due tipologie di output: l'energia primaria e le emissioni di CO_2.
Nella tabella sono riportati i risultati suddivisi in energia primaria grigia non rinnovabile ed energia primaria grigia totale, espressi sia in megajoule che in chilowattora.
Un'ulteriore scansione prodotta dal software riguarda la fase in cui le emissioni e i consumi vengono effettuati. Le fasi seguono la normativa UNI EN 15804 che classifica sotto la categoria A i processi produttivi del materiale da costruzione (*cradle to gate*), con la voce B la fase d'uso e con la lettera C il fine vita.

Vengono riportati per coerenza solo i dati riguardanti la fase del processo produttivo del materiale al fine di essere correttamente confrontabile con i risultati prodotti dagli altri software.

Figura 137: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti mediante software OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria dei dati di OneClick LCA.

.

	Energia primaria grigia, non rinnovabile [MJ/m2/a]	Energia grigia primaria totale [MJ/m2/a]	Energia primaria grigia, non rinnovabile [kWh/m2/a]	Energia grigia primaria totale [kWh/m2/a]	Riscaldamento globale [kgCo2e/m2/a]
A1-A3	7,49	70,67	2,08	19,63	1,76

Si evince dalla figura 138 che i componenti che richiedono un consumo dell'Energia Primaria totale sono i muri interni e le chiusure verticali opache dell'edificio, pari al 65,3% equivalente a 45,26 MJ/m²/a. La restante parte dei consumi, corrispondente a 24,05 MJ/m²/a, è a carico dei solai interpiano, del solaio controterra e del solaio di copertura.

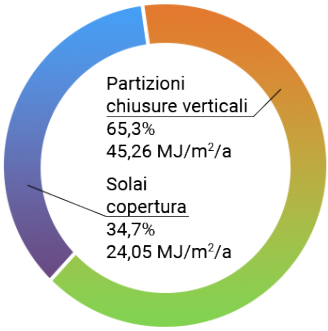


Figura 138: Grafico a torta rappresentante l'EP totale relativa ai componenti della Circular Tower, ottenuto con il software OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria dei dati ottenuti da OneClick LCA.

Parallelamente, osservando la figura 139, si può affermare che i materiali che compongono i solai sono responsabili di una percentuale maggiore di emissioni (1,00 $kgCO_{2e}/m^2/a$) rispetto ai componenti delle chiusure verticali opache (0,76 $kgCO_{2e}/m^2/a$).

Mediante la tabella rappresentata nell'immagine 141 è stato possibile individuare un errore nei risultati. Si osserva che ai materiali cartongesso, argilla e alluminio non sono stati correlati e calcolati le rispettive emissioni prodotte per la loro realizzazione.
È stato ipotizzato che l'errore sia prodotto dalle limitazioni della versione di prova del software. È stato escluso che il problema sia annesso alla tipologia di banca dati effettuando delle verifiche utilizzando dei materiali differenti.

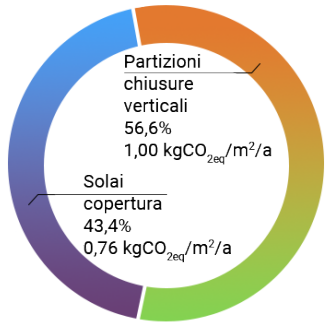


Figura 139: Grafico a torta rappresentante le emissioni di CO_2 relative ai componenti della Circular Tower, ottenuto con il software OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria dei dati ottenuti da OneClick LCA.

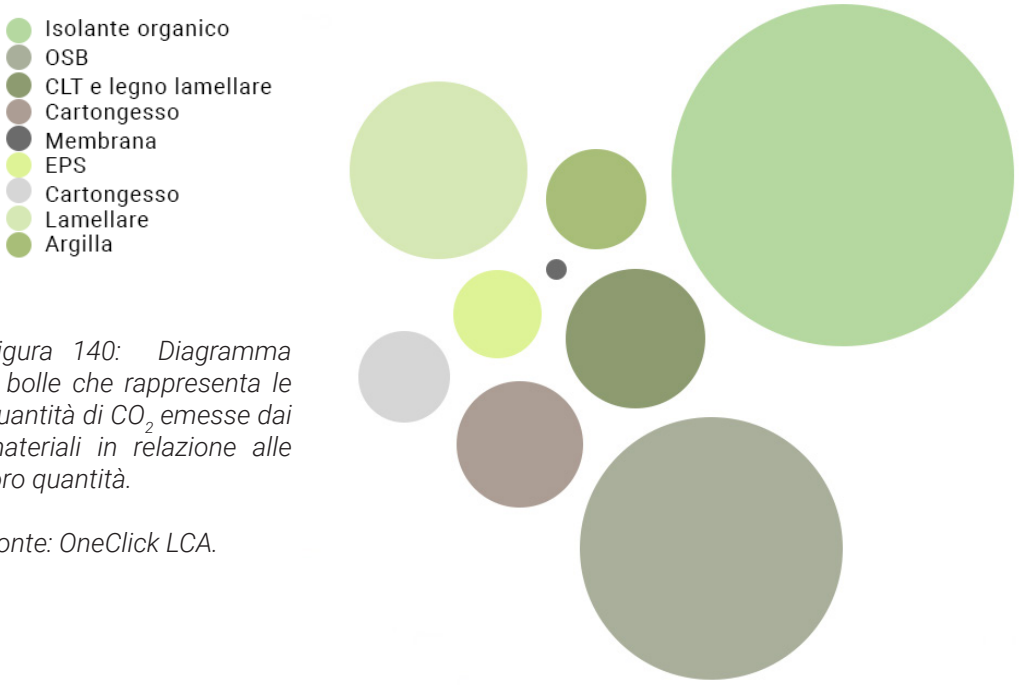


Figura 140: Diagramma a bolle che rappresenta le quantità di CO_2 emesse dai materiali in relazione alle loro quantità.

Fonte: OneClick LCA.

Figura 141: Schermata acquisita da OneClick LCA nella sezione dei risultati.

Fonte: OneClick LCA.

I materiali più contribuenti (Energia grigia primaria totale) — Confronta i dati

No.	Risorsa	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Cradle to gate (A1-A3)	Alternative sostenibili	
1.	Wood fiber insulation, 147.5 kg/m3	680 tonnellate CO_2e	42.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
2.	Particle board, OSB, PF glue, wetroom appl., 605 kg/m3	517 tonnellate CO_2e	32.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
3.	3-layer cross laminated timber (CLT), PVA glue, 453 kg/m3	232 tonnellate CO_2e	14.3 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
4.	Parquet, 2 ply, 11 mm, 6.1 kg/m2	87 tonnellate CO_2e	5.4 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
5.	Wood wool cement board, lightweight, 400 kg/m3	44 tonnellate CO_2e	2.7 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
6.	Solid wood, spruce/fir/larch, air-dried, planed, 485 kg/m3	38 tonnellate CO_2e	2.3 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
7.	Expanded polystyrene insulation (EPS), 16.8 kg/m3	12 tonnellate CO_2e	0.7 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
8.	Polyethylene (PE) film, 920 kg/m3	7,5 tonnellate CO_2e	0.5 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
9.	Gypsum plasterboard, 850 kg/m3	kg CO_2e	0.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
10.	Limestone plates, hardened, 2600 kg/m3	kg CO_2e	0.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
11.	Clay bricks, 900 kg/m3	kg CO_2e	0.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare
12.	Aluminium cladding, 4 mm, 7.1 kg/m2	kg CO_2e	0.0 %	Mostra alternative sostenibili	Aggiungi per confrontare

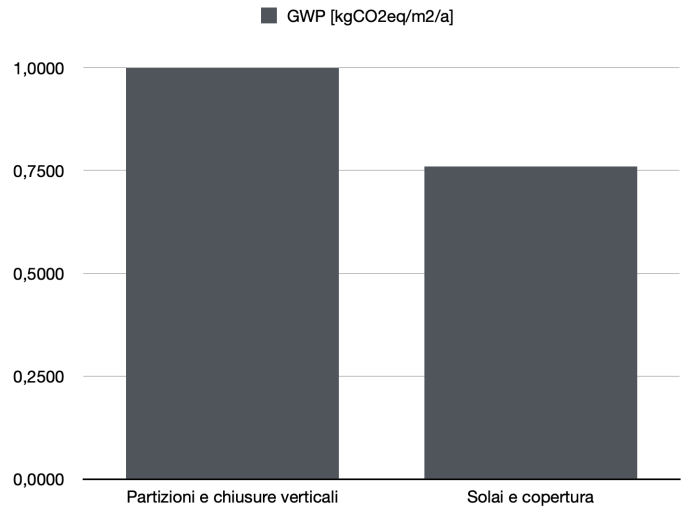
Elaborazione dei risultati

I risultati del calcolo effettuato con OneClick LCA sono stati rielaborati, come per gli altri software. Sono stati prodotti i grafici a barre e a torta che mostrano, in questo caso, i risultati di EP non rinnovabile e di GWP raggruppati per categoria. Gli elementi verticali, rappresentati dalle chiusure verticali opache e dalle partizioni interne, e quelli orizzontali, composti dai solai controterra, interpiano e di copertura, sono stati definiti rispettivamente sotto le voci di *Partizioni e chiusure verticali* e *Solai e copertura*. La mancata suddivisione degli output da parte del software non ha premesso di confrontare pienamente i risultati per ogni elemento.

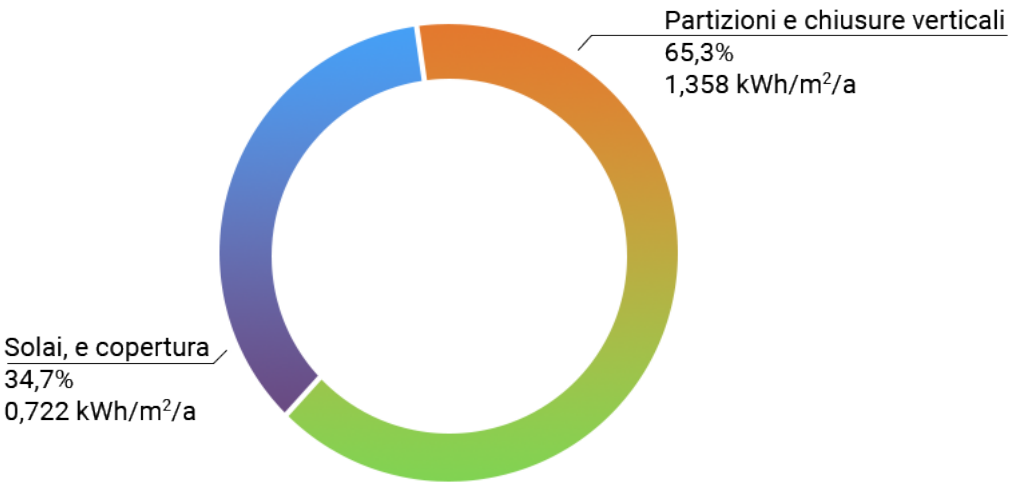
Figura 142: Risultati dell'EP ottenuti dal software OneClick LCA rielaborati al fine del confronto.

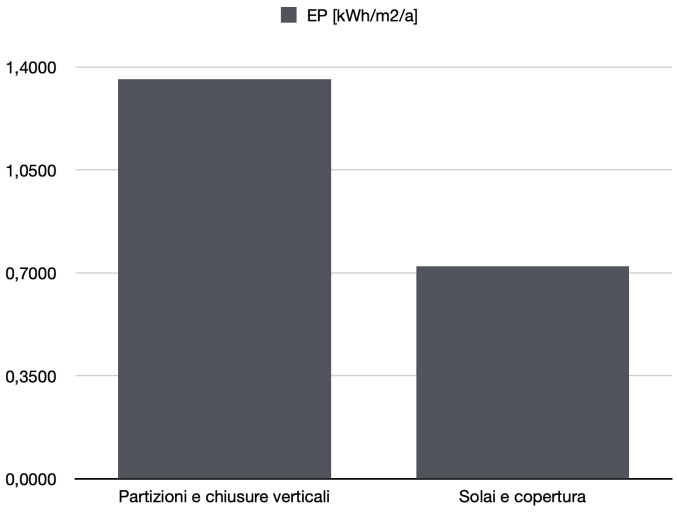
Fonte: OneClick LCA.

Global Warming Potential



Energia primaria non rinnovabile





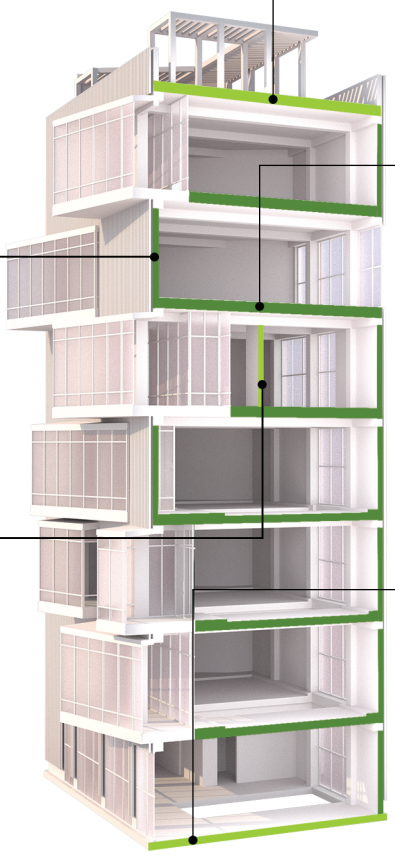
OneClick LCA

UNITÀ FUNZIONALE : m^2 DI SUPERFICIE RISCALDATA

CONFINE DEL SISTEMA : A1-A3

GWP_{tot}: 1,76 $kgCO_{2eq}/m^2/a$

$EP_{nr,tot}$: 2,08 $kWh_{oil}/m^2/a$



SOLAI DI COPERTURA

Dati di input

Fibra di legno:	
Insulation, cellulose fibre	*34,2m³*
OSB:	
OSB	*5,3 m³*
Membrana:	
Plastic membrane(0,05mm)	*139m²*

+

CHIUSURE VERTICALI

Dati di input

OSB:	
OSB	*29,8m³*
Fibra di legno:	
Insulation, cellulose fibre	*105,2m³*
Cartongesso:	
Gypsum plasterboard	*10,3m³*
Legno di rivestimento:	
Solid wood	*44,3m³*

+

SOLAI INTERPIANO

Dati di input

OSB:	
OSB	*19,5m³*
Gessofibra:	
Fibre reinforced	*12,2m³*
Legno mineralizzato:	
Wood wool cement borad	*48,8m³*
Legno di quercia:	
Parquet	*6,8m³*
Argilla:	
Clay bricks	*13,2m³*
Fibra di legno:	
Insulation, cellulose fibre	*9,7m³*

+

PARTIZIONI INTERNE

Dati di input

Fibra di legno:	
Insulation, cellulose fibre	*14,8m³*
Cartongesso:	
Gypsum plasterboard	*3,7m³*
CLT:	
Cross Laminated Timber	*26,9m³*

SOLAI CONTROTERRA

Dati di input

Fibra di legno:	
Insulation, cellulosefibre	*11,2m³*
Gessofibra:	
Fibre reinforced	*3,5m³*
Legno mineralizzato:	
Wood wool cement board	*13,9m³*
Legno di quercia:	
Parquet	*2,0m³*
Argilla:	
Clay bricks	*5,6m³*

=

Dati di output

GWP:	1,000 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	1,358 $kWh_{oil}/m^2/a$

=

Dati di output

GWP:	0,760 $kgCO_{2eq}/m^2/a$
EP_{nr}:	0,722 $kWh_{oil}/m^2/a$

Potenzialità e limiti del software

In seguito all'esperienza di utilizzo di OneClick LCA sono state proposte alcune considerazioni.

Fase di utilizzo
Il software permette il suo utilizzo nella fase di *concept design* grazie alla possibilità di effettuare confronti nella scelta dei materiali in merito al loro impatto, guidando così la progettazione. Inoltre, il programma si presta ad un utilizzo nelle fasi successive di progettazione avanzata perché può considerare tutti i componenti presenti nel modello BIM senza escluderne a priori parti di essi.

Database
OneClick LCA non è *site specific* grazie alla vasta e completa banca dati globale in continuo aggiornamento e al suo sviluppo in lingua inglese.

Limiti nel calcolo
Gli esiti delle analisi non sono certe poiché la versione trial del software esclude parte dei materiali e del loro impatto ambientale correlato. È stato riscontrato il disagio nel *workflow* che impone il passaggio continuo dall'interfaccia del plug-in a quella della pagina web per

Figura 143: Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria.

effettuare, ad esempio, la lettura dei risultati, dovendo reimportare i dati ad ogni aggiornamento svolto. Inoltre, non è possibile eseguire l'abbinamento dei materiali in due momenti diversi poiché alla chiusura del plug-in le informazioni inserite non vengono tenute in memoria.

Dati di input

Nella versione *trial* è stata individuata la limitazione in merito al numero di progetti da eseguire. A causa di questo non è stato possibile effettuare un confronto tra diversi metodi di calcolo e l'analisi si è limitata all'utilizzo della licenza *For Switzerland: Trial for Graue*. Il processo di inventario è velocizzato dallo strumento di filtro, in grado di individuare rapidamente i materiali in base alla loro nomenclatura, alla provenienza o alla banca dati. Di particolare interesse è risultata la possibilità di escludere dal calcolo le "famiglie" non oggetto dello studio, evitando di apportare modifiche al modello 3D. Anche la versione *trial* permette di svolgere dei confronti tra diversi scenari dello stesso progetto, ed inoltre mostra per ogni materiale delle alternative più sostenibili.

Dati di output

Infine, la versione *trial* non consente la visualizzazione dei *benchmark* impossibilitando il confronto dell'edificio oggetto di studio con gli standard relativi a edifici aventi la medesima

destinazione d'uso e ubicazione.
In merito agli output generati dal programma è utile la suddivisione delle emissioni e dei consumi per ogni fase del ciclo vita del manufatto e la loro rappresentazione attraverso diverse unità di misura. OneClick LCA propone diverse soluzioni grafiche per esprimere al meglio i risultati ottenuti.

Supporto informatico e costo
Il software richiede una licenza molto onerosa ed un supporto informatico adeguato essendo realizzato per un uso professionale.
La diffusione di questo programma è correlata all'opportunità di servirsi di software BIM al fine di una veloce computazione, limitando così gli errori connessi al calcolo e alle trascrizioni manuali delle quantità.

2.4 Confronto dei dati e conclusioni

Gli output forniti dai tre software basati su metodologia LCA non sono pienamente confrontabili.

Fase di utilizzo
Il confronto ha reso possibile affermare che il software ZPF si rivela ottimale solo per effettuare analisi preliminari e confronti in una fase di *concept design*, assistendo il progettista nella scelta di prodotti con il minor impatto ambientale, poiché i dati di input e i relativi risultati sono indicativi. OneClick LCA e SimaPro, grazie alla possibilità di inserimento di numerosi dati di input e le numerose banche dati, sono impiegabili sia per la fase di *concept design* che per fasi più avanzate.

Database
La prima limitazione riguarda i confini del sistema. OneClick LCA, possiede un database globale ed esegue l'analisi su tutto il ciclo vita raggruppando i risultati secondo i moduli standardizzati dalle nromative EN 15804 e ISO 21930. SimaPro, invece, utilizzando la banca dati Ecoinvent, permette una definizione di sistema più estesa, ma al fine del caso studio è stato scelto di considerare il ciclo *crandle to gate*. In quanto a ZPF-tool, avente una banca dati che attinge solo in parte da database KBOB,

analizza ipoteticamente un sistema *crandle to grave* ma non è stato possibile verificarlo in quanto non sono state ritrovate informazioni a riguardo.

Limiti nel calcolo

ZPF e OneClick permettono il calcolo dell'Energia Primaria non rinnovabile, mentre il metodo CED utilizzato su SimaPro tiene conto dell'Energia Primaria proveniente da tutte le fonti, tra cui: non rinnovabile fossile, non rinnovabile nucleare, rinnovabile da biomassa, rinnovabile da vento, sole e geotermico e infine rinnovabile dall'acqua.

Al fine di effettuare un confronto ottimale è stato preso in analisi per ogni software il confine del sistema imposto da ZPF-tool, come mostrato nelle figure 106, 119, 135.

Gli altri software avrebbero potuto considerare confini di sistema più ampi. È stato modificato il modello tridimensionale BIM per poter quantificare i materiali.

Dati di input

ZPF risulta incompleto se utilizzato in una fase di progettazione avanzata, in quanto non vengono specificati i confini di sistema, le banche dati sono limitate e gli input sono poco personalizzabili. Sarebbe opportuno inserire maggiori riferimenti normativi, una banca dati più ampia e permettere la modifica della soluzioni tecno-

logiche offerte. Il progettista verrebbe guidato con maggior consapevolezza nella scelta dei prodotti edilizi.
OneClick LCA è stato il programma che ha permesso di eseguire la fase di inventario più rapidamente, grazie all'interoperabilità con il software BIM utilizzato per il progetto.

Dati di output
Di seguito vengono riportati nella tabella riassuntiva (Figura 144) i risultati nelle categorie corrispondenti.

	EP non rinnovabile [$kWh_{oil\text{-}eq}/m^2/a$]	GWP [$kg_{CO2eq}/m^2/a$]
ZPF-tool	16,50	3,77
SimaPro	2,24	1,59
OneClick LCA	2,08	1,76

Figura 144: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti da ZPF-tool, SimaPro e OeClick LCA confrontabili.

Fonte: Elaborazione propria.

I risultati forniti da ZPF e OneClick LCA sono automaticamente normalizzati a metro quadrato annuo.
Mentre ZPF riporta solo il consumo di Energia Primaria non rinnovabile e la quantità di emissioni di gas climalteranti (CO_{2eq}), OneClick LCA permette anche di ottenere la quantità di Energia Primaria totale, espressa in diverse unità di misura. Per relazionare i dati di SimaPro è stato necessario normalizzare manualmente i dati di output, poiché è stata scelta come unità funzionale l'intero edificio.
Tutti e tre i programmi svolgono il calcolo della quantità di emissioni di CO_2 equivalente.

Le cifre in output di ZPF riportate nella figura 144 non sono quelle fornite dal programma poiché è stata esclusa la quota parte di *tecniche della casa*, essendo un dato approssimativo riguardante la fase d'uso e rendendo disomogenei i confini del sistema. Inoltre, nella figura 144 non sono riportati i punti di impatto ambientale UBP ottenuti da ZPF poiché sono una categoria di impatto poco diffusa (utilizzata prettamente sul territorio svizzero) e non calcolabile dagli altri software, di conseguenza non confrontabile.

In merito al consumo di Energia Primaria da fonte non rinnovabile, si è potuto appurare che i risultati ottenuti dal software ZPF si discostano da quelli ottenuti dagli altri due programmi, che invece si confermano vicendevolmente.
Osservando il grafico in figura 145 si nota come il dato proveniente da ZPF (16,5 kWh/m^2/a) sia circa otto volte maggiore rispetto a quelli

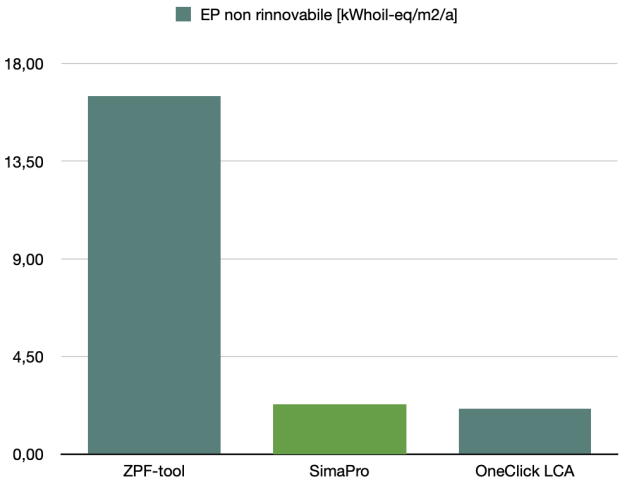


Figura 145: Grafico a barre che riporta i risultati di EP non rinnovabile di ZPF-tool, SimaPro e OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria.

di OneClick (2,08 kWh/m^2/a) e SimaPro (2,24 kWh/m^2/a).
Inoltre, il grafico mostra, con un colore diverso, il dato di SimaPro di EP non rinnovabile (2,24 kWh/m^2/a) estrapolato dal calcolo dell'EP totale. Questo dato secondario è approssimativo perché è stato ricavato attraverso una proporzione strutturata sui valori di OneClick (EP totale=19,3 kWh/m^2/a). Emerge dai risultati che L'EP non rinnovabile è circa il 10% di quella totale.

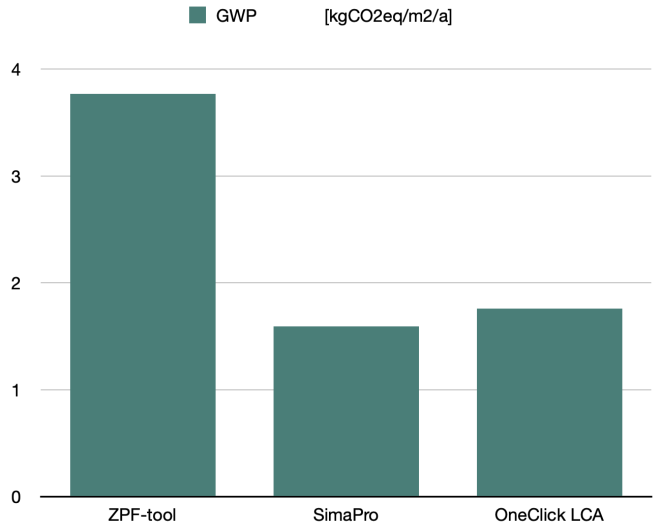


Figura 146: Grafico a barre che riporta i risultati di EP totale di SimaPro e OneClick LCA.

Fonte: Elaborazione propria.

Il grafico in figura 146 descrive la quantità di emissioni di CO_2 equivalente espressa in kg di CO_{2eq}/m^2/a. Anche in questo caso il risultato di ZPF-tool (3,77 kgCO_{2eq}/m^2/a) è più elevato rispetto a quello di OneClick (1,76 kgCO_{2eq}/m^2/a) e di SimaPro (1,59 kgCO_{2eq}/m^2/a) ma in un ordine di grandezza più confrontabile.

Tenendo in considerazione la banca dati limitata e l'approssimazione dell'abbinamento con i materiali, il dato risulta accettabile.

Essendo la Circular Tower caratterizzata da un'estesa superficie di involucro trasparente, pur non essendo possibile con ZPF e quindi non utile al fine del confronto, è stato effettuato un calcolo dell'impatto ambientale dei serramenti mediante il software SimaPro. Da questa analisi è emerso che nonostante la superficie dell'involucro trasparente (250 m^2) sia nettamente inferiore a quella delle chiusure verticali opache (950 m^2), l'EE contenuta è molto simile. L'Energia Primaria spesa per il prodotto finale dell'involucro trasparente è pari a 1.85E6 MJ ed equivale al 23.8% sul totale dell'edificio, mentre per le chiusure verticali opache, sono stati consumati 1.99E6 MJ di energia, pari a 25.6%. Il dato del consumo dovuto dai serramenti è dovuto quasi per la totalità dai processi produttivi del telaio in alluminio.

In ZPF, nella fase di progettazione è molto utile il grafico che confronta i *benchmark* con i risultati ottenuti, permettendo una valutazione preliminare del proprio progetto. La classificazione degli impatti mediante i *benchmark* sarebbe stata possibile anche con il software OneClick LCA se fosse stata utilizzata una versione completa. SimaPro non permette di giudicare

i risultati ottenuti in relazione agli standard di riferimento.
SimaPro e OneClick LCA sono predisposti per utilizzare molte metodologie di calcolo ottenendo una vasta serie di risultati specifici, permettendo confronti più dettagliati. Inoltre, la possibilità di esportare diverse tipologie di grafici aiuta l'user nella comprensione e nell'analisi dei risultati.

Supporto informatico e costo
A favore di OneClick LCA vi è la possibilità di integrazione con un plug-in nei software BIM e sfruttare la capacità di computare i materiali a vantaggio della fase di inventario, rilevata come la più onerosa in termini di tempo.
SimaPro e OneClick LCA richiedono licenze costose, mentre ZPF è gratuito e utilizzabile su diversi *device* (computer, tablet, smartphone).

L'interfaccia *web based* di OneClick permette l'utilizzo su dispostivi "portatili" e, con una versione completa, i dati compilati sono consultabili da diversi dispositivi grazie alla memorizzazione *in cloud*.

Nella pagina seguente è riportata una tabella riassuntiva che mostra a confronto le considerazioni effettuate.

Figura 147: Tabella riassuntiva di confronto delle caratteristiche dei software.

Fonte: Elaborazione propria.

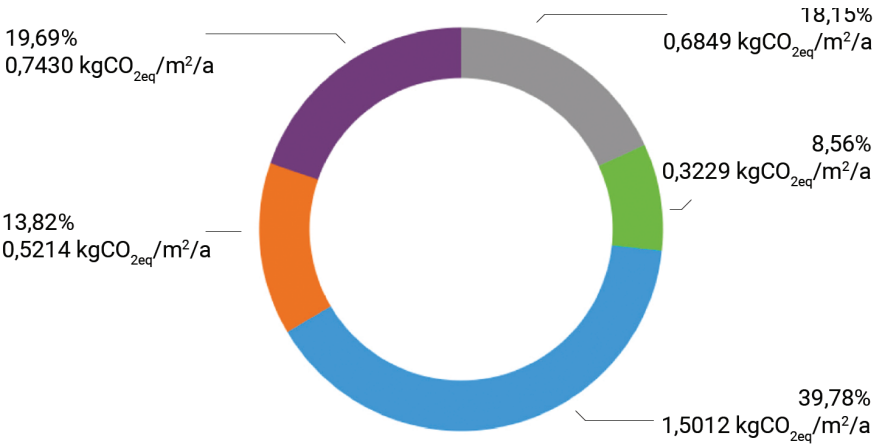
		ZPF-tool	SimaPro	OneClick LCA
FASE 1	Unità funzionale	m^2	m^2	m^2
	Metodo di calcolo	-	CED IPCC 100 a	For Switzerland: Trial for Graue Energie
	Confine del sistema	-	A1-A4 B4-B5 C1-C4	A1-A3 B4-B5 C1-C4
	Normative	SIA 2032	ISO 14040 ISO 14044	ISO 14040 EN 15804 EN 15978 ISO 21931-1 ISO 21929
FASE 2	Banche dati	KBOB parzialmente	Swiss Input Output Ecoinvent 3 - allocation, default - unit	KBOB
	Inventory	Ambiente riscaldato: -Pareti interne -Involucro -Solai interpiano -Copertura* -Solaio controterra*	Ambiente riscaldato: -Pareti interne -Involucro -Solai interpiano -Copertura -Solaio controterra -Serramenti interni -Finiture -Involucro trasparente -Struttura portante Ambiente non riscaldato: -Solai vano scala -Involucro vano scala -Impianto MEP -Sistema di elevazione -Serramenti vano scala -Solai serre -Copertura serre	Ambiente riscaldato: -Pareti interne -Involucro -Solai interpiano -Copertura -Solaio controterra -Serramenti interni -Involucro trasparente -Struttura portante Ambiente non riscaldato: -Solai vano scala -Involucro vano scala -Sistema di elevazione -Serramenti vano scala -Solai serre -Copertura serre
FASE 3	Categorie di impatto analizzate	UBP [UBP/m^2/a] THG [kg_{CO2eq}/m^2/a] EP non rinnovabile [$kWh_{oil\text{-}eq}/m^2$/a]	GWP [kg_{CO2eq}] EP tot [MJ]	EP non rinnovabile [MJ/m^2/a] EP tot [MJ/m^2/a] GWP [$kgCO_{2e}/m^2$/a]

CONSIDERAZIONI SUI SOFTWARE	Versione e licenza	Versione 1.1	Licenza per studenti 2017	Trial 0.8.1
	Fase di progetto idonea	Preliminare	Da preliminare a dettagliata	Da preliminare a dettagliata
	Tipologia di uso	Per studi preliminari	Per certificazioni ambientali e di bioedilizia	Per certificazioni ambientali e di bioedilizia
	Costo	Gratuito	Onereso	Oneroso
	Supporto informatico	Non necessario	Necessario	Necessario
	Interoperabilità BIM	No	No	Si

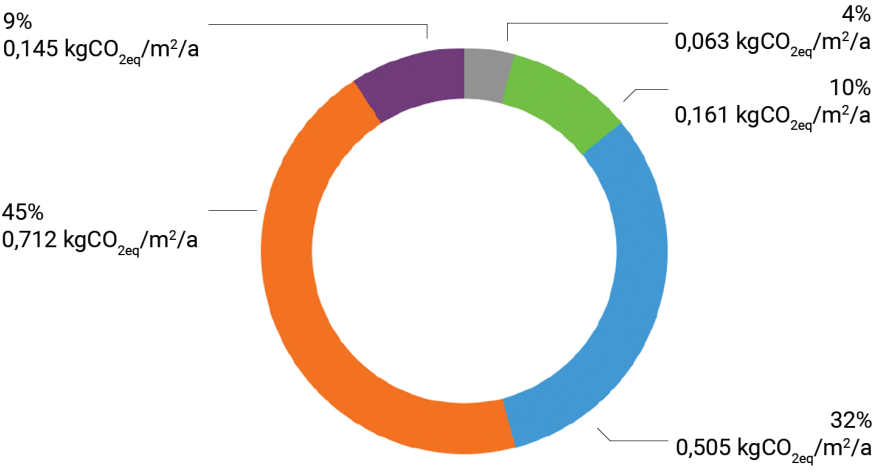
L'asterisco (*) indica i componenti presi in analisi da ZPF senza la possibilità di inserire dati specifici.
In grigio: i componenti dell'edificio analizzabili ma esclusi per il confronto.

GWP [$kgCO_{2eq}/m^2/a$]

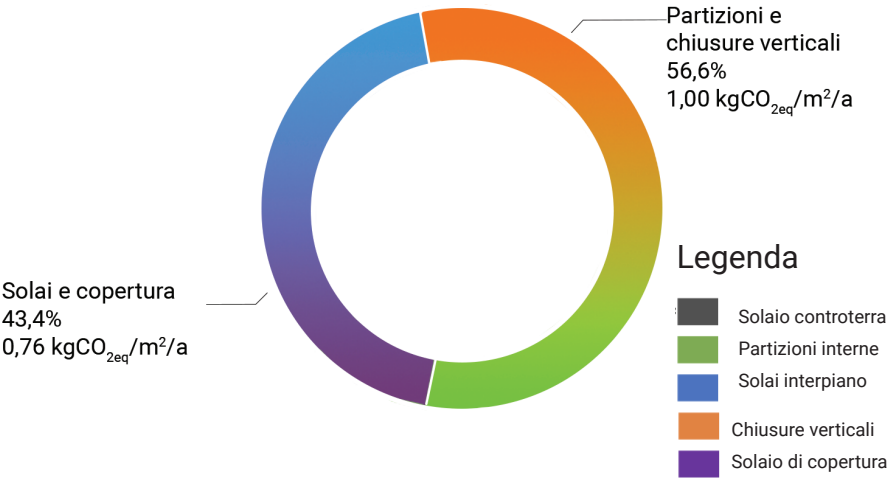
ZPF-tool



SimaPro



OneClickLCA



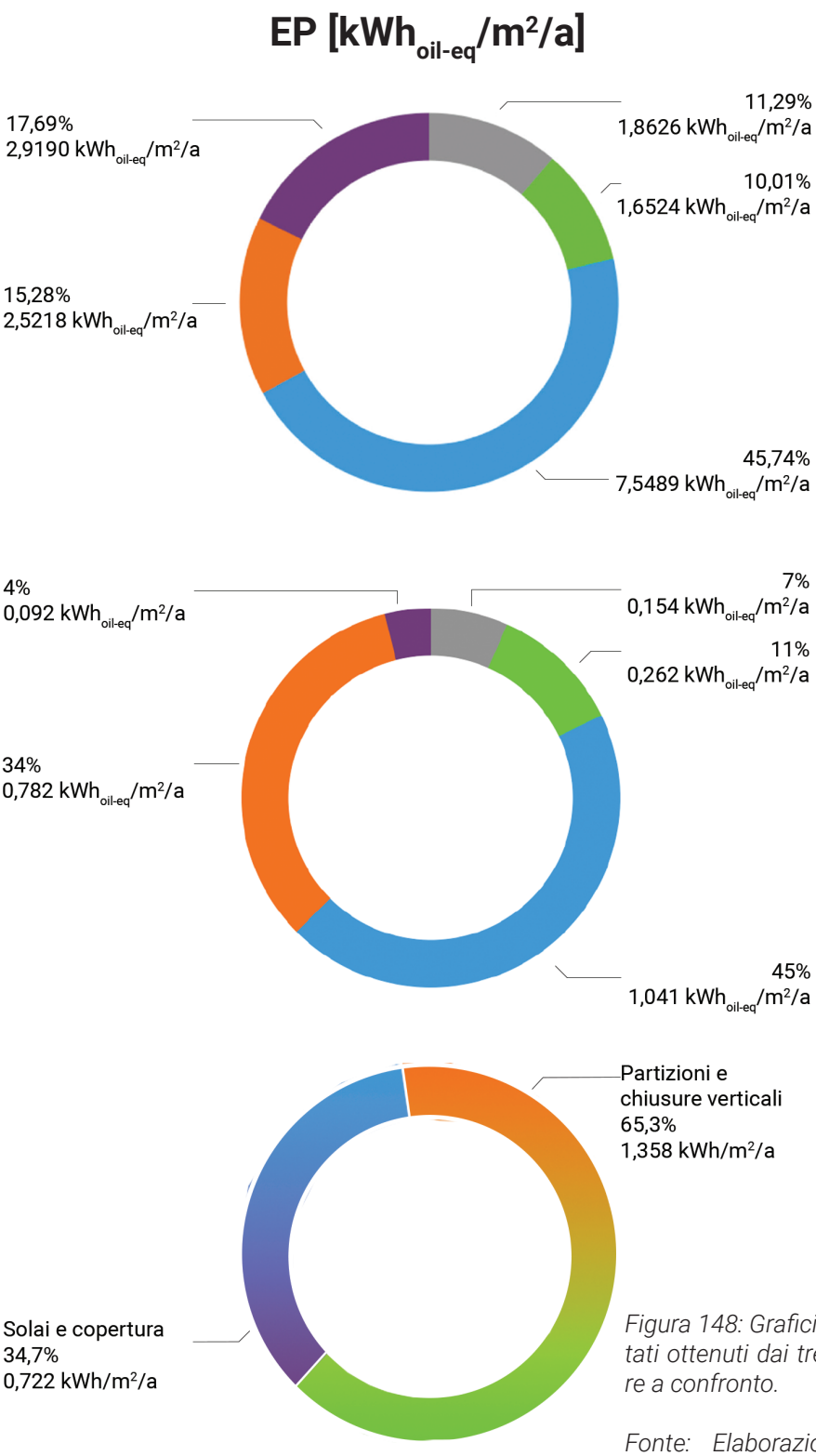


Figura 148: Grafici dei risultati ottenuti dai tre software a confronto.

Fonte: Elaborazione propria.

CAPITOLO 3

Progettazione della circolarità attraverso il DfD applicato al caso studio “Circular Tower”

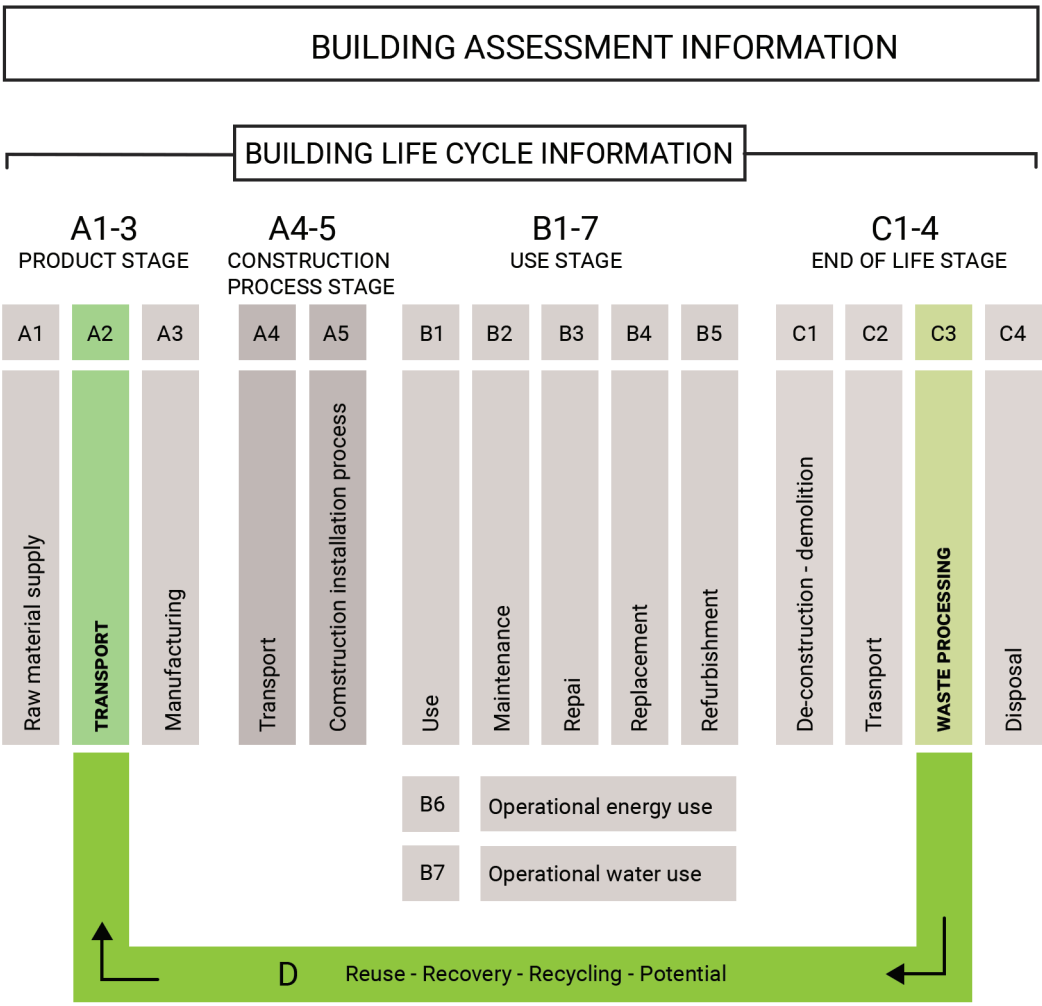
3.1 L’Economia Circolare come strumento di sostenibilità
3.2 Il DfD come espressione della circolarità nel settore edile
3.3 Scenari di fine vita dei materiali e dei componenti dell’edificio
3.4 Considerazioni conclusive

L'analisi del ciclo vita consente un miglioramento nei risultati di impatto ambientale grazie a un'ottimizzazione della scelta dei prodotti. Osservando le fasi del ciclo vita divise nei moduli standardizzati dalle normative ISO 14040-44 è possibile identificare come ultima quella di riuso e riciclo (D). In una concezione circolare un'ottima gestione di questa fase permetterebbe l'estensione della vita utile dei materiali, secondo il processo *closing the loop* (da modulo D a modulo A), riportato in figura 149.

Il *Design for Deconstruction* permette di considerare l'edificio come una banca di materiali, sostituibili nel tempo e riutilizzabili per la realizzazione di altri edifici al termine del ciclo vita del primo, consentendo di ridurre lo spreco e ottimizzando l'uso delle di risorse.
Grazie all'applicazione di questo metodo di progettazione viene chiuso il cerchio ottenendo un sistema circolare e riducendo e/o eliminando le fasi di estrazione di materie prime e di trasporto.

Figura 149: La collocazione del DfD nei moduli standardizzati del ciclo vita.

Fonte: Elaborazione propria.


BUILDING ASSESSMENT INFORMATION
BUILDING LIFE CYCLE INFORMATION
A1-3
PRODUCT STAGE
A4-5
CONSTRUCTION PROCESS STAGE
B1-7
USE STAGE
C1-4
END OF LIFE STAGE
A1
A2
A3
A4
A5
B1
B2
B3
B4
B5
C1
C2
C3
C4
Raw material supply
TRANSPORT
Manufacturing
Transport
Comstruction installation process
Use
Maintenance
Repai
Replacement
Refurbishment
De-construction - demolition
Trasnport
WASTE PROCESSING
Disposal
B6
Operational energy use
B7
Operational water use
D
Reuse - Recovery - Recycling - Potential

3.1. L'Economia Circolare come strumento di sostenibilità

Il concetto di Economia Circolare (EC) è una delle tematiche alla base dello sviluppo sostenibile e si contrappone al modello tradizionale di economia lineare, noto anche come "prendere-fare-consumare-scartare" (Figura 150). Quest'ultima forma di economia è fondata sul considerare illimitati le risorse del pianeta e l'assorbimento dei rifiuti e dell'inquinamento. [1] [2]

La consapevolezza della quantità limitata di risorse è un concetto intrinseco nella visione dell'EC che ne garantisce una gestione più accurata, concependo i prodotti, le componenti e i materiali come risorse, nonostante essi siano giunti alla fase finale del proprio ciclo di vita [3]. Viene così generato un ciclo chiuso nel quale la quantità di risorse aumenta, considerando i prodotti che hanno perso la funzionalità per la quale sono stati realizzati come materie prime riutilizzabili.

[1] Camilleri, M. (2018). Closing the loop for resource efficiency, sustainable consumption and production: a critical review of the circular economy. International Journal of Sustainable Development, 1.
[2] Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. Journal of Cleaner Production, 228, 882–900.
[3] Bassi, F., & Dias, J. G. (2019). The use of circular economy practices in SMEs across the EU. Resources, Conservation and Recycling, 146, 523–533.

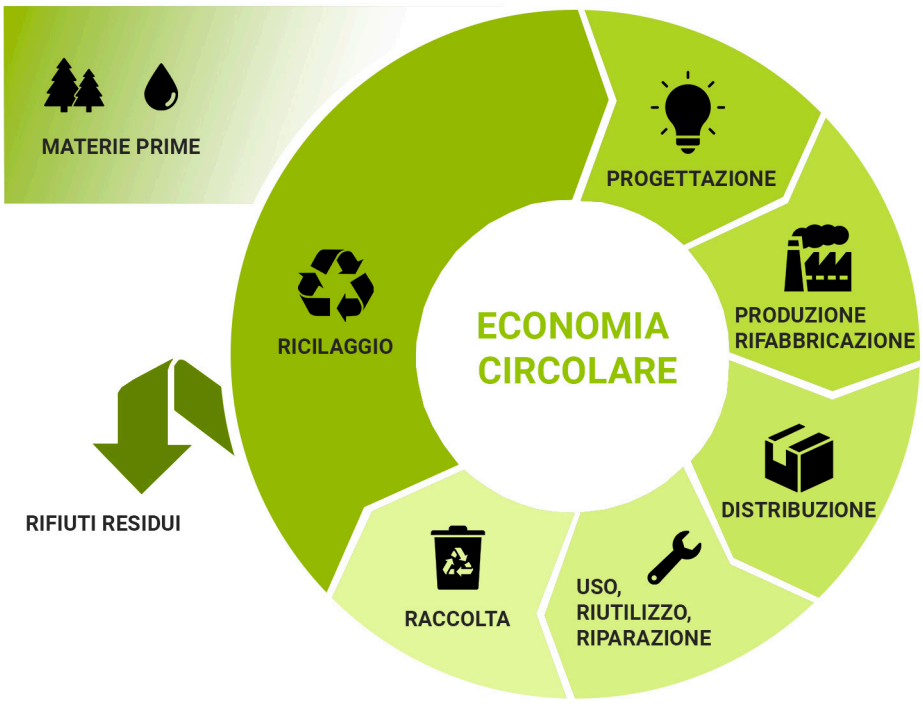


Figura 150: Funzionamento dell'economia circolare.

Fonte: Produzione propria basata su "Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi. (2015, December 2). Attualità Parlamento Europeo. "

Il processo di "*closing the loop*", oltre ad aumentare l'efficienza dell'uso delle risorse, favorisce l'aumento dei benefici economici sull'uso dei materiali e la mitigazione degli impatti ambientali. [4]

La prima testimonianza in merito al concetto di economia globale relazionato alla circolarità, che permetterebbe lo sviluppo della vita umana nel lungo periodo, risale al 1966 nell'articolo "*The Economics of the Coming Spaceship Earth*" di Kenneth E. Boulding.

[4] Camilleri, M. A. (2018). The circular economy's closed loop and product service systems for sustainable development: A review and appraisal. Sustainable Development, 27(3), 530–536.

Attualmente non è riconosciuta un'unica definizione di Economia Circolare, ma in seguito a una revisione della letteratura si è potuto affermare che i principi fondamentali siano condivisi. L'EC è incentrata su uno sviluppo sostenibile in modo sistemico, sia in termini ambientali che economici e sociali, interessandosi alla produzione di rifiuti, agli impatti ambientali e alla distinzione tra crescita economica e domanda di risorse. [5] [6] [7]

La transizione verso un Economia Circolare richiede un cambiamento culturale e strutturale, che riguardi tutte le parti interessate nella catena del valore e implica la capacità di innovare non solo cicli produttivi e modelli di consumo, ma anche approcci culturali e stili di vita tramite l'*eco-design* dei prodotti, che considera l'intero ciclo di vita del prodotto già in fase di progettazione.

[5] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11–32.
[6] Homrich, A. S., Galvão, G., Abadia, L. G., & Carvalho, M. M. (2018). The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. Journal of Cleaner Production, 175, 525–543.
[7] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221–232.

Figura 151: Alcuni simboli dell'eco-design.

Fonte: Produzione propria.

L'eco-design può essere definito come la progettazione di un nuovo prodotto, processo, sistema gestionale, servizio o procedura, attraverso cui si consegue, lungo tutto il ciclo di vita, una riduzione dei consumi di materie prime, di energia, delle emissioni ambientali, accrescendo la capacità di creare valore e soddisfare i bisogni dei consumatori nel rispetto degli standard sociali e ambientali. [8]

[8] Nava, C. (2019). cambiamenti climatici ed economia circolare: tecnologie abilitanti e life cycle thinking per lo sviluppo sostenibile. ArcHistoR, 6.

3.1.1 I principi e le strategie dell'Economia Circolare

La riduzione degli input e output dei processi è il principio chiave dell'Economia Circolare.
Come input vengono considerati l'utilizzo di materie prime e di energia, mentre i rifiuti e le emissioni costituiscono gli output. La riduzione può avvenire utilizzando diverse strategie finalizzate a restringere e rallentare il flusso di risorse, prodotti ed emissioni all'interno di un sistema economico. [9][10]

Il concetto di durabilità dei materiali risulta fondamentale poiché se viene incrementata la qualità del prodotto di conseguenza la durata della sua vita si estenderà, non producendo altra domanda per sostituirlo. Inoltre, il riutilizzo di un bene durevole o di un suo componente può essere ripianificato reinserendolo nel ciclo economico, evitandone il *downcycling* [11].

[9] Bassi, F., & Dias, J. G. (2019). The use of circular economy practices in SMEs across the EU. Resources, Conservation and Recycling, 146, 523–533.
[10] Fan, Y. V., Lee, C. T., Lim, J. S., & Klemes, J. J. (2019). Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy Author links open overlay panel. Cleaner Production, 232, 1482–1491.
[11] Il downcycling è la diminuzione della qualità di un materiale o prodotto riutilizzato o riciclato, rispetto all'utilizzo o allo scopo originale
[12] J. Bastos, M. Rizzari, E. Agosti, V. D'Alonzo, & C. Hoffmann. (2021). Analisi dello stato dell'arte: Report sui settori e attività produttive per promuovere l'Economia Circolare.

Un'ulteriore strategia riguarda l'utilizzo comunitario dei beni e dei servizi. In questo modo può essere raccolta una certa quantità di domanda per lo stesso servizio e venire soddisfatta attraverso un'unica offerta, ad esempio l'uso della mobilità condivisa potrebbe sostituire lo spostamento con i veicoli privati. [12]

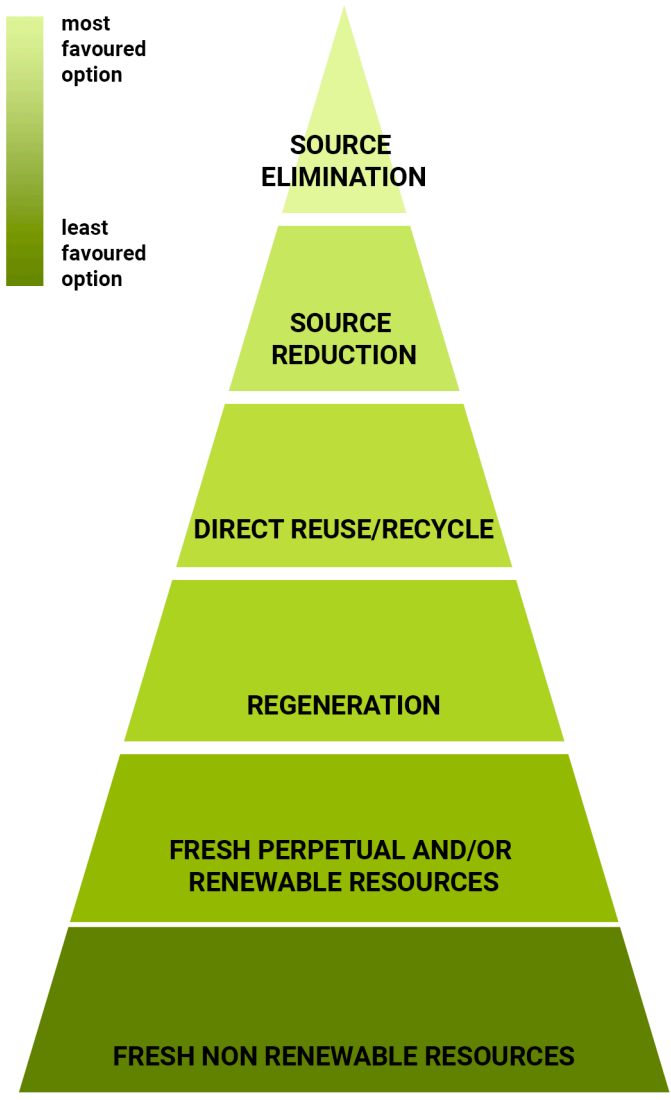


Figura 152: La gerarchia della gestione sostenibile delle risorse.

Fonte: produzione propria basata sulla lezione della Prof.ssa Pagliolico, S. (27 marzo 2021). Corso: Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali. Politecnico di Torino.

L'EC è resa operativa attraverso processi di conservazione del valore (VRP) noti anche come imperativi R che riportano alcune tra le strategie di riduzione dei flussi, organizzate in una piramide in cui al vertice vi sono le più virtuose. [13][14][15]

- **Ridurre**: utilizzare meno risorse limitando la quantità di prodotti in circolazione grazie al prolungamento del ciclo di vita utile o della condivisione, sfruttando il potenziale inutilizzato;
- **Riutilizzare**: donare una "seconda vita" ai materiali che sono in buone condizioni;
- **Riparare**: sostituzione delle parti danneggiate per prolungare la vita utile del prodotto;
- **Rifabbricare**: rimettere in circolo parti secondarie come prodotti con nuove funzionalità;
- **Riciclare**: estendere il ciclo di vita del materiale stesso, utilizzandolo come materia prima seconda (MPS) in nuovi processi produttivi per ottenerne di nuovi di qualità maggiore (*upcycling*), uguale o inferiore (*downcycling*).

[13] Bressanelli, G., Saccani, N., Pigosso, D. C., & Perona, M. (2020). Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda. Sustainable Production and Consumption, 23, 174–188.
[14] Camilleri, M. (2018). Closing the loop for resource efficiency, sustainable consumption and production: a critical review of the circular economy. International Journal of Sustainable Development, 1, 1
[15] Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 153,

La simbiosi industriale, praticabile tra diverse aziende, è un ottimo strumento per ottimizzare il modello di Economia Circolare. Il suo funzionamento consiste nello scambio di risorse tra aziende, trasformando quello che un'azienda considera come rifiuto, in una risorsa per un'altra. Il risultato è l'ottenimento di un sistema economico locale chiuso, vantaggioso sia per gli attori che per gli *stakeholders*. [16]

Ad ogni modo, vi sono potenziali ostacoli per attuare processi circolari [17]. Ad esempio, il fatto che le materie prime primarie siano più economiche di quelle prime secondarie può risultare un impedimento per le aziende che intendono sviluppare un *business model* circolare [18].
Un motivo è che nelle materie prime non vi sono riflesse le esternalità negative, perciò, da un punto di vista commerciale, non c'è alcun incentivo a modificare il modello economico.

[16] Camilleri, M. (2018). Closing the loop for resource efficiency, sustainable consumption and production: a critical review of the circular economy. International Journal of Sustainable Development, 1, 1
[17] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). Business Models for the Circular Economy. In Opportunities and Challenges for Policy. OECD.
[18] Per modello di business circolare si intende un modello che crea valore dall'uso delle risorse fisiche. In un modello lineare, il produttore rinuncia al controllo sul prodotto e sulle materie prime utilizzate attraverso la vendita.

Le scelte attuate dalle aziende tradizionali influiscono notevolmente sulla fattibilità del recupero e sull'estensione della vita dei prodotti.
Vi è la necessità di collaborazione sia all'interno delle catene di valore che attraverso esse. Questo processo aumenta i costi legati alla ricerca e alla transizione verso un modello di business differente da quello lineare.
Le normative esistenti influiscono negativamente sulla transizione verso un'economia circolare. Questo avviene ad esempio tassando il lavoro in maniera più elevata rispetto al capitale e alla quantità di materie prime. [19] [20]
Inoltre, il passaggio ad un altro *business model* è lento poiché è necessario un nuovo mercato e un cambiamento di modello di consumo. In molti settori c'è solo una piccola fetta di produttori che cerca di differenziarsi realizzando beni durevoli, ma relativamente costosi. Infatti, nonostante i prodotti di qualità superiore possano essere più convenienti nel corso della loro vita, molti consumatori optano per prodotti economici e poco durevoli.

[19] Skånberg, K., Wijkman, A., & Berglund, M. (2017). The Circular Economy and Benefits for Society: Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency. The Club of Rome.
[20] Yamaguchi, S. (2018). International Trade and the Transition to a More Resource Efficient and Circular Economy: A Concept Paper. OECD Trade and Environment Working Papers.

Questo significa che devono essere spesso sostituiti rapidamente risultando economicamente ed ecologicamente sconvenienti. [21]

Un metodo di analisi per quantificare una corretta progettazione circolare è, oltre all'LCA analizzato nel capitolo precedente, il *Material Flow Analysis* (MFA). [22]
Questa metodologia viene utilizzata per caratterizzare i flussi di materiali e le scorte. Può essere utilizzata parallelamente o come supporto all'LCA. Entrambi sono metodi comunemente accettati per quantificare e certificare le prestazioni ambientali di un edificio e il consumo di risorse e possono facilitare il processo decisionale. [23]

[21] Böni, H., & Hischier, R. (2018). Weiter- und Wiederverwendung von elektrischen und elektronischen Geräten. In Ökologische und ökonomische Analyse. Empa.
[22] Malabi Eberhardt, L. C., Van Stijn, A., Stranddorf, L. K., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2021). Environmental Design Guidelines for Circular Building Components: The Case of the Circular Building Structure. Abdollah Shafieezadeh.
[23] Hellweg, S., & Heeren, N. (2018). Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows (1st ed., Vol. 23). Journal of industrial ecology.

Nove regole di progettazione ambientale per componenti di edifici circolari.

1. Riprogettare il modello tecnico, industriale e di business integralmente e in co-creazione con i soggetti coinvolti e le parti interessate.

2. Considerare in un progetto non solo la produzione attuale ma tutti i cicli futuri.

3. Considerare i componenti edilizi come un insieme di sotto componenti, parti e materiali con diversi e molteplici cicli di utilizzo e di vita. Determinare le opzioni di progettazione circolare e i parametri di progettazione nella materializzazione del componente dell'edificio.

4. Considerare tutti i parametri di progettazione circolare in interrelazione tra loro. La semplice sostituzione di materiali lineari con materiali più circolari non comporta necessariamente un componente edilizio più circolare.

5. Combinare opzioni di design circolari invece di concentrarsi su una singola opzione facilitando più VRP.

6. Ottimizzare gli impatti relativi al trasporto quando il componente è ingombrante o pesante.

7. Preferire la riprogettazione completa di un componente dell'edificio rispetto all'ottimizzazione dell'attuale lineare variante.

8. Per ottenere un componente edilizio con una lunga vita funzionale e con le migliori prestazioni ambientali è necessario applicare i seguenti principi: utilizzare materiali durevoli con una vita estesa mantenendo la progettazione quanto più snella possibile, mantenere i componenti in posizione il più a lungo possibile facilitando adattamenti e regolazioni nel tempo, dopo la fine dell'uso dei componenti e dei materiali bisogna incentivare i cicli multipli per prolungarne l'uso e chiudere il ciclo prima dello smaltimento finale.

9. Se il componente non durerà a lungo allora è necessario applicare i seguenti principi: effettuare un design snello, con materiali secondari a basso impatto, lunga durata tecnica della vita, e rinnovabili.

3.1.2 I livelli micro, meso e macro nell'EC

Per quanto riguarda la portata economica delle prospettive e delle strategie sull'EC, possiamo distinguere tre livelli corrispondenti a dimensioni o scale diverse. [24][25]

A scala di microeconomia le strategie di EC trattano temi legati a singoli processi in singole aziende. Le strategie aziendali mirano all'attuazione di misure per migliorare la circolarità dei propri sistemi di produzione per ottenere le etichettature di certificazione ambientale e per partecipare agli appalti pubblici. Non vi è una diretta gestione dei rifiuti da parte delle aziende in quanto questo servizio è erogato da enti terzi.
L'efficienza e l'efficacia di queste strategie di livello *micro* dipendono dai quadri istituzionali e dalla capacità dei decisori di adottare strategie proattive e integrate di EC. [26]

[24] Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2017). The circular economy and circular economic concepts-a literature analysis and redefinition. Thunderbird International Business Review, 60(5), 771–782.
[25] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11–32.
[26] J. Bastos, M. Rizzari, E. Agosti, V. D'Alonzo, & C. Hoffmann. (2021). Analisi dello stato dell'arte: Report sui settori e attività produttive per promuovere l'Economia Circolare.

La prospettiva *meso* riguarda la cooperazione tra diverse aziende impegnate nello scambio di risorse. Per ottenere un sistema circolare di livello comunitario, è necessaria l'azione delle pubbliche amministrazioni.

A scala di macroeconomia si considerano reti territoriali estese le quali richiedono l'integrazione di quattro sistemi: il sistema industriale, il sistema di infrastrutture, il quadro culturale e il sistema sociale.

3.1.3 Gli aspetti territoriali dell'EC

L'utilizzo delle strategie di Economia Circolare è influenzato dalle specificità del territorio sulla quale esse devono essere applicate, tra cui gli aspetti culturali, spaziali ed economici. [27]

All'interno del documento "Towards a territorial definition of a circular economy: exploring the role of territorial factors in closed-loop systems" [28] è possibile ritrovare gli aspetti fondamentali legati al territorio che è necessario considerare per applicare un'efficace EC tra cui le sue caratteristiche geografiche che influenzano la tipologia di domanda e di conseguenza la tipologia specifica dei prodotti realizzati. Inoltre, vi è da considerare il grado di disponibilità e di conoscenza delle tecnologie e delle infrastrutture, definiti fattori territoriali *hard*.

[27] Blomsma, F., Pieroni, M., Kravchenko, M., Pigosso, D. C., Hildenbrand, J., Kristinsdottir, A. R., Kristoffersen, E., Shahbazi, S., Nielsen, K. D., Jönbrink, A. K., Li, J., Wiik, C., & McAloone, T. C. (2019). Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. Journal of Cleaner Production, 241, 118271.
[28] Tapia, C., Bianchi, M., Pallaske, G., & Bassi, A. M. (2021). Towards a territorial definition of a circular economy: exploring the role of territorial factors in closed-loop systems. European Planning Studies, 1–20.

Sono classificati fattori territoriali *soft* quelli legati allo scambio e alla condivisione di conoscenze e agli accordi di *governance* e istituzionali.
I fattori *hard* assicurano una definizione proficua delle strategie locali, mentre quelli *soft* funzionano da catalizzatori per la transizione verso la circolarità. [29]

[29] J. Bastos, M. Rizzari, E. Agosti, V. D'Alonzo, & C. Hoffmann. (2021). Analisi dello stato dell'arte: Report sui settori e attività produttive per promuovere l'Economia Circolare.

3.1.4 Il contesto europeo

Come già evidenziato nel paragrafo precedente, per ridurre l'elevato consumo di materie prime primarie è necessario mantenere il conto dei flussi di materiale e sostanze utilizzate nelle catene produttive.
Il vantaggio ecologico è che riusando prodotti il più a lungo possibile ci sarebbe una riduzione delle quantità di energia, acqua e prodotti chimici per il riciclaggio. Quest'ultimo scenario è ideale soltanto quando un prodotto non può essere diviso, riparato, ricondizionato e riutilizzato [30]. In questo modo l'impatto ambientale diminuisce [31].
Si ripercuotono anche vantaggi economici poiché i costi di produzione possono essere ridotti attraverso un uso più efficiente delle materie prime e il valore aggiunto e la relativa competitività dell'economia possono essere aumentati. In alcuni casi, può essere spostato il valore sul contesto nazionale da quello estero riutilizzando, elaborando e riciclando i prodotti usati

[30] Il calcolo di una valutazione del ciclo di vita garantisce che i progetti o le misure di economia circolare contribuiscano alla riduzione dell'inquinamento ambientale. Una valutazione del ciclo di vita include tutti gli impatti ambientali rilevanti durante l'intero ciclo di vita dei prodotti.
[31] L'impatto ambientale totale registra l'influenza dei consumi su tutte le aree dell'ambiente. Il calcolo si basa sui punti di impatto ambientale (UBP). I singoli impatti sono ponderati in base alla distanza dagli obiettivi ambientali svizzeri (distanza dall'obiettivo).

a livello locale e importando in cambio minor quantità di nuovi prodotti. Vari studi prevedono che, grazie a questo processo, si può assistere a un potenziale aumento del Prodotto Interno Lordo e dei posti di lavoro.
Ad esempio, gli studi [32] mostrano significative opportunità economiche per promuovere l'Economia Circolare. In uno scenario ottimale per l'UE, ritengono possibile un aumento dell'efficienza delle risorse del 3% e risparmi sui costi dei materiali fino a 630 miliardi di dollari (nel settore industriale) entro il 2030. Ciò comporterebbe un'ulteriore crescita del PIL di 7 punti percentuali (+ 0,5 punti percentuali/anno), una riduzione dell'uso delle risorse primarie del 32% e una riduzione delle emissioni di CO_2 del 48%. Per l'Inghilterra è stato stimato che potrebbero derivare fino a 100.000 posti di lavoro aggiuntivi e una parte sostanziale potrebbe essere attribuita ad attività manuali di riparazione, riutilizzo e riciclaggio.
I primi passi nell'ambito di questo studio sono stati mossi per la valutazione delle misure che potrebbero rafforzare alcuni approcci alla circolarità come una progettazione durevole, una progettazione per la riparazione e il ritrattamento e quella relativa alla composizione dei ma-

[32] Morgan, J., Mitchell, P., Ellen MacArthur Foundation, & Club of Rome. (2022). Employment and the circular economy Job creation in a more re-source efficient Britain. Green Alliance.

teriali eventualmente riciclabili. Gli effetti sono stati quantificati in termini di punti di impatto ambientale, stimando quali fossero i positivi e quali negativi. La valutazione per le imprese è avvenuta sulla base delle variazioni dei costi sostenuti per la messa in atto e del valore aggiunto nazionale.

"Closing the loop: An UE action Plan for the Circular Economy" è il percorso accolto nel dicembre 2015 pubblicato in un rapporto completo il 4 marzo del 2019 dalla Commissione Europea [33].
Il passaggio da una società definibile "produzione-consumo-scarto" a una completamente circolare entro il 2050 è necessario per sopperire alla riduzione delle risorse e agli impatti climatici, evidenziati dalla crisi attuale.
Il Parlamento Europeo ha fortemente voluto una nuova agenda per lo sviluppo sostenibile, incentrata sull'efficienza delle risorse, che impone dei cambiamenti profondi nei modelli attuali di produzione e consumo. Un'impostazione basata sull'intero ciclo di vita dovrebbe

[33] Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. (2015). European commission.
[34] Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. (2019). In Der Europäische Grüne Deal. Europaische Kommission.

migliorare l'utilizzo dei materiali secondari, evitare la produzione di rifiuti, favorire le pratiche di riutilizzo, contenere le emissioni di CO_2, stimolare la crescita economica e creare opportunità di lavoro. [34]

Le quattro direttive sull'EC

Il 4 luglio 2018, in seguito ai negoziati interistituzionali tra il Parlamento e il Consiglio, sono entrate in vigore le quattro direttive europee sull'economia circolare ((UE) 2018/849, (UE) 2018/850, (UE) 2018/851 e (UE) 2018/852) che presentano come obiettivi il riciclo del 55% di RSU, del 65% degli imballaggi, la raccolta separata dei rifiuti tessili e pericolosi, e il compostaggio o la raccolta separata dei rifiuti biodegradabili entro il 2025. [35][36][37][38]
È stato predisposto un tetto massimo di conferimento in discarica del 10% di RSU. Le percentuali appena citate dovranno incrementare in previsione degli obiettivi del 2035 e del 2050.

[35] Direttiva (UE) 2018/849 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione
[36] Direttiva (UE) 2018/850 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
[37] Direttiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018b). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
[38] Direttiva (UE) 2018/852 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Le direttive promuovono inoltre degli strumenti economici per scoraggiare il collocamento in discarica e stimolano le simbiosi industriali al fine di trasformare i sottoprodotti di una filiera in MPS per altri circuiti. Non vi è da dimenticare la volontà di armonizzare i metodi di calcolo dei tassi di riciclaggio e l'estensione della responsabilità del produttore di immettere prodotti ecologici sul mercato. [39]

Le quattro direttive del "pacchetto economia circolare", pubblicate il 14 giugno 2018, modificano 6 precedenti direttive su rifiuti (2008/98/Ce), imballaggi (1994/62/Ce), discariche (1999/31/Ce), rifiuti elettrici ed elettronici (2012/19/Ue), veicoli fuori uso (2000/53/Ce) e pile (2006/66/Ce). La strategia chiave è la realizzazione di beni riutilizzabili e durevoli effettuando la minor produzione di scarti. Le normative sull'eco-design dei prodotti hanno svolto un ruolo fondamentale nelle strategie per le materie prime critiche [40] inserendo principi di longevità e riparabilità.

La Commissione Europea, il 1 ottobre del 2019, accoglie per la prima volta misure per elettrodomestici sostenibili e illustra le caratteristi-

[39] Trerotola, G. (2018, September 4). Entrate in vigore le quattro direttive europee sull'Economia Circolare. Confindustria. https://economiacircolare.confindustria.it/entrate-in-vigore-le-quattro-direttive-europee-sulleconomia-circolare/

[40] Comunicazione Mercati dei materiali di base e materie prime: sfide e approcci risolutivi. (2011). Commissione Europea.

che della riparabilità di un edificio e dei pezzi di ricambio [41]. Inoltre, esemplifica i requisiti in merito ai consumi energetici in *stand-by*, alla riparabilità, all'agevolazione dello smontaggio e al riciclo quando il prodotto è arrivato al termine del suo ciclo vita e in sintesi sostiene la messa in atto dell'Economia Circolare.

L'estensione dell'utilizzo dei prodotti in plastica monouso sarà vietata nel futuro prossimo e saranno intraprese delle alternative convenienti descritte in "La plastica nell'economia circolare", strategia del Consiglio Della Commissione Europea, del 21 maggio 2019, adottata sulle norme dei prodotti in plastica monouso e sugli attrezzi da pesca. L'Economia Circolare si sta sviluppando e accrescendo in molti stati dell'Unione Europea [42]. Un precursore in questo settore è L'Olanda con il programma nazionale definito "Un'Economia Circolare nei Paesi Bassi entro il 2050". La Francia con la sua strategia di economia circolare introduce il divieto di obsolescenza programmata, un emendamento della legge sulla garanzia per promuovere la conservazione delle risorse e la pianificazione di obblighi di dichiarazione. [43]

[41] Comunicato stampa Nuove regole per elettrodomestici più sostenibili. (2019). Commissione Europea.
[42] Kazmipaw. (2018). Summary report - EEA webinar on recently adopted national CE policies. Eionet Forum.
[43] LOI. (2012). Definire obiettivi comuni per una transizione energetica di successo, rafforzare l'indipendenza energetica e la competitività economica della Francia, preservare la salute umana e l'ambiente e combattere il cambiamento climatico. Repubblica Francese.

Il piano d'azione per l'EC

Oltre le quattro nuove direttive, nell'ambito del Green Deal europeo, il nuovo piano d'azione per l'economia circolare orienta l'UE verso una realtà capace di contribuire alla neutralità climatica, interrompendo la tendenza dello sfruttamento incontrollato delle risorse e delle problematiche ad esso connesse come il degrado ambientale, la produzione di rifiuti e l'impoverimento delle risorse naturali. Questo piano prevede iniziative incentrate sulla progettazione di prodotti e del loro ciclo vita, promuovendo il processo dell'economia circolare e i consumi sostenibili. Le risorse sfruttate devono restare nell'economia europea il più a lungo possibile. [44]
Il futuro delle prossime generazioni è messo a rischio ed è per questo motivo che la transizione verso un'Economia Circolare deve entrare in sinergia con le azioni per il clima, in particolare nei settori dell'energia e delle industrie ad alta intensità di carbonio. Tra le iniziative principali, nel settimo programma di azione per l'ambiente, vi è l'efficientamento dell'utilizzo delle risorse, sbloccando il potenziale economico dell'UE ed incentivando la competitività globale con la creazione di nuovi posti di lavoro. [45]

[44] Efficienza delle risorse ed economia circolare | Note tematiche sull'Unione europea | Parlamento Europeo. (2022, September 1). https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/76/efficienza-delle-risorse-ed-economia-circolare

Nel marzo 2020 la Commissione Europea ha proposto il primo pacchetto di misure per accelerare la transizione verso un'EC come annunciato nel Piano d'azione.
Già nel 2021 il Parlamento richiede norme più severe sul riciclo con obiettivi vincolanti da raggiungere entro il 2030 per l'uso e il consumo di materiali. Ad ottobre 2022 il Parlamento ha approvato una revisione delle norme sugli inquinanti organici persistenti (POP) per ridurre la quantità di sostanze chimiche pericolose nei rifiuti e nei processi di produzione. Le nuove regole introdurranno limiti più severi, vieteranno alcune sostanze chimiche e manterranno gli inquinanti lontani dal riciclaggio. [46]

La Commissione, al fine di realizzare un mercato europeo di prodotti sostenibili, mira a realizzare passaporti di prodotto digitali in modo da condividere la descrizione del ciclo vita del prodotto, attraverso l'estensione della Direttiva per la progettazione ecocompatibile.
In tal modo i consumatori risultano correttamente informati e si eliminerebbero le pratiche

[45] Comunicazione della Commissione Europea al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse. (2011). In EUR-Lex (COM(2011) 571). Commissione Europea.
[46] Efficienza delle risorse ed economia circolare | Note tematiche sull'Unione europea | Parlamento Europeo.

di *greenwashing* [47].

La sostenibilità dei prodotti è realizzabile attraverso il miglioramento della loro durata, la riduzione dell'obsolescenza e la possibilità di rivendicare, da parte dei consumatori, il "diritto alla riparazione".

In ambito edilizio, l'industria delle costruzioni è chiamata all'utilizzo di questi prodotti per diminuire i rifiuti, le emissioni e gli impatti ambientali. I deputati hanno inoltre richiesto che la durata del ciclo di vita degli edifici si estenda e che vengano stabiliti degli obiettivi di riduzione dell'impronta di carbonio dei materiali, così come dei requisiti minimi sull'efficienza energetica e delle risorse. [48]

[47] *Greenwashing*: la falsa politica di sostenibilità di un'azienda

[48] Economia circolare: in che modo l'UE intende realizzarla entro il 2050? (2022, October 10). Europarl. https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modo-l-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050

3.1.5 Il contesto svizzero

Il rapporto “Green Economy - Misure federali per una Svizzera sostenibile” nel 2016 [49] ha creato un resoconto sullo sviluppo del piano d’azione per l’economia verde creando le basi per un miglioramento futuro.
È stata creata la Rete Svizzera (Reffnet.ch) per promuovere l’efficienza delle risorse nelle aziende e sono stati avviati vari progetti per chiudere i cicli dei materiali.
Inoltre, con l’associazione “go for impact” è stata creata un’ampia rete di dialogo sull’aumento dell’efficienza delle risorse.
Dal 2014 al 2017 sono stati sviluppati ben 11 principi guida per la gestione dei rifiuti e la chiusura dei cicli, da attuarsi entro il 2030, sostenendo l’impegno volontario e sfruttando il potenziale di efficienza e conservazione delle risorse.
La Svizzera ha sviluppato i settori degli appalti pubblici sostenibili, della prevenzione dei rifiuti, dei mercati finanziari sostenibili e della formazione professionale superiore.
Nella sua seduta del 19 giugno 2020 il Consiglio Federale dell’Ambiente (UFAM) ha deciso di concentrarsi sulla conservazione delle risorse e sull’Economia Circolare conducendo uno stu-

[49] Fachinformationen Wirtschaft und Konsum. (2021, December 31). bafu.admin.ch.

dio in stretta collaborazione con il settore privato, che mostra gli hotspot ambientali nella catena di approvvigionamento di otto importanti settori svizzeri [50]. Sulla base dello studio è stato creato l'Atlante ambientale delle catene di approvvigionamento svizzere. [51]
Il DATEC (Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni) è stato incaricato di presentare proposte per un pacchetto di misure al più tardi entro la fine del 2022.
Conformemente alla priorità 4 «Prevenzione dei rifiuti» del rapporto sulla Green Economy «Misure federali per una Svizzera sostenibile e a risparmio di risorse», l'UFAM sta sviluppando anche una strategia di prevenzione dei rifiuti per la Svizzera in collaborazione con i Cantoni, altri uffici federali e le imprese organizzazioni.

Lo Stato Federale è riuscito a compiere un obiettivo importante come quello di mettersi al passo con lo standard normativo dell'Unione Europea sul piano d'azione dell'economia verde e con l'ordinanza dei rifiuti, in particolare la differenziazione delle tipologie di dismissione, gli

[50] Si tratta di: lavorazione della carne, industria chimica, ingegneria meccanica, immobiliare ed edilizia, servizi sanitari e sociali, commercio alimentare,commercio di abbigliamento, tessili e calzature, commercio di elettrodomestici
[51] Alig, M., Frischknecht, R., Nathani, C., Hellmuller, P., & Stolz, P. (2018). Umweltatlas Lieferketten Schweiz. Treeze Ltd & Rutter Societaco AG.

obblighi di licenza e segnalazioni e la disciplina delle diverse pene di deposito.
La Svizzera si è focalizzata, nel lavoro metodologico, sull'accettazione nelle pratiche delle parti coinvolte. Mentre nel recupero dei metalli non ferrosi dai residui di incenerimento o il riciclaggio del fosforo lo stato federale ne è già leader. [52]
Nel 3° rapporto di valutazione ambientale della Svizzera, pubblicato nel 2017, l'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) sottolinea che quest'ultima ha compiuto forti crescite nel rendere la sua economia più sostenibile.
Ad esempio, potrebbe fornire maggiori incentivi per ridurre l'impatto ambientale e rafforzare il principio "chi inquina paga", come le emissioni di ammoniaca, precursori dell'ozono (biossido di azoto, composti organici volatili e metano), ossido di zolfo e particolato che dovrebbero essere ridotte ulteriormente.
L'introduzione della responsabilità estesa del produttore, ad esempio per i materiali da costruzione, come in Germania, creerebbe anche un incentivo a includere i costi alla fine del ciclo di vita. [53]

[52] Umwelt Schweiz 2018. (2018). In Bericht des Bundesrates. Schweizerische Eidgenossenschaf.
[53] Organization for Economic Co-operation and Development. (2017). Umweltprufbericht: Schweiz 2017. OECD.

Possibili misure per l'applicazione dell'EC in Svizzera

Alcuni Paesi dell'UE hanno già adottato misure fiscali che comprendono la riduzione dell'IVA e delle aliquote per premiare la chiusura dei cicli dei prodotti, come ad esempio l'incremento di servizi di riparazione. [54]

Il rapporto del Consiglio federale del 19 giugno 2020 [55] si è interrogato se le misure adottate in Europa possano essere adatte al territorio svizzero.

È emerso che gli incentivi per sostenere l'EC aiuterebbero lo Stato federale a ridurre la dipendenza dalle importazioni delle materie prime. Vi è però da considerare che le attuali aliquote fiscali svizzere sono più basse rispetto alla media europea, quindi l'effetto ottenuto risulterebbe minore. Finora le diverse aliquote fiscali in Svizzera si basavano sulla politica sociale e non sulla politica ambientale o delle risorse.

Un'altra strada percorribile è l'aumento della tassazione di beni ad alto impatto ambientale.

Adottando lo sconto dell'IVA si ridurrebbero le emissioni di gas serra di 10000 ton di CO_2 equivalente e l'inquinamento ambientale di circa 20 miliardi di punti di inquinamento ambientale (0,01% dei 193.468 miliardi di UBP in totale)

[54] Proposta di Direttiva del Consiglio che modifica la Direttiva 2006/112/CE in materia di aliquote IVA. (2018). Commissione Europea.

[55] Tasse e altre misure per promuovere l'economia circolare. (2020). Confederazione Svizzera.

ma, se questo sconto fosse riversato sui compratori, i servizi di riparazione aggiuntivi potrebbero essere ridotti. Tuttavia, il presente provvedimento non porterebbe a una semplificazione, ma a un sistema più complesso. Quanti più beni e servizi sono soggetti all'aliquota ridotta, tanto maggiori sono gli oneri amministrativi.

Lo studio ha analizzato ulteriori possibilità, tra cui l'istituzione di dichiarazioni utili a informare i consumatori e incoraggiarli a fare acquisti più consapevoli e rispettosi nei confronti dell'ambiente. Ciò aumenterebbe la trasparenza del mercato, invogliando i produttori a realizzare dei beni che rispettino le informazioni dichiarate.

Il *report* "Tasse e altre misure per promuovere l'economia circolare" ha esaminato quattro dichiarazioni utili: la durata della vita utile del prodotto, la garanzia che offre il produttore, la misura in cui il bene può essere riparato e lo scenario potenziale di riciclaggio. Gli obblighi di dichiarazione possono, in presenza di adeguate condizioni quadro, avere un effetto positivo sull'ambiente.

Questa iniziativa deve poter essere economicamente efficiente senza aumentare i costi per le imprese produttrici. Questo potrebbe essere garantito da metodi di misurazione adeguati e

standardizzati.
Infine, un'ulteriore proposta descrive l'applicazione di un tributo sull'acquisto dei beni (AgE) che corrisponde a una garanzia al fine di invogliare il compratore, nel caso di danneggiamento del prodotto, a ripararlo piuttosto che comprarlo nuovo. Un anticipo obbligatorio, versato al momento dell'acquisto del prodotto, servirebbe a correggere la logica fallimentare del mercato in cui le riparazioni sono più onerose dei nuovi acquisti.

Gli aspetti negativi rilevati in merito all'applicazione di tali tassazioni sono l'aumento dei costi di transazione, lo squilibrio in termini di responsabilità e rischio danneggiando i consumatori poiché essi dovranno sostenere i costi delle riparazioni. Ulteriori oneri sono generati dalle banche per mantenere l'importo bloccato. È positivo l'incentivo per i produttori a realizzare beni durevoli dichiarandone la qualità offerta, e per i consumatori di ridurre le quantità di nuovi acquisti.
L'interesse di molti consumatori verso l'Economia Circolare è esplicitato dall'aumento dei centri di riparazione emersi recentemente. Inoltre, anche molte aziende offrono già prodotti in garanzia.
Il ruolo delle imprese può essere ulteriormente rafforzato stipulando, ad esempio, accordi industriali vincolanti.

Concludendo, le misure sopra citate dovrebbero essere attuate in modo sinergico, per aumentarne l'efficacia, e sostenute da una legislazione adeguata.

Risulterebbe necessario adeguare il diritto di garanzia, il diritto dell'IVA e apportare modifiche al diritto di proprietà secondo un approccio giuridico sistematico e completo.
Una promozione efficace dell'Economia Circolare può essere realizzata al meglio attraverso un insieme ben coordinato di misure dal lato dell'offerta e della domanda che vengono applicate in diversi punti del ciclo, in modo che sia i produttori che i consumatori possano assumersi la responsabilità.

3.2 Il DfD come espressione della circolarità nel settore edile

Il settore edile è responsabile della produzione di un grande volume di rifiuti, i quali hanno un tasso di recupero molto basso. Questo è dovuto dalla messa in discarica, dall'incenerimento e dal riciclo mediante *downcycling* dei prodotti da *Construction&Demolition* (C&D). Nonostante le aziende che operano nel settore delle costruzioni abbiano l'obbligo di separare i rifiuti prodotti, questo raramente accade a causa delle tempistiche e di una mancata pianificazione, limitando l'implementazione di strategie efficaci di Economia Circolare. [56][57]
È comune assistere a processi di demolizione frettolosi e non pianificati che producono una mescolanza di materiali indifferenziati, riducendo la possibilità di riutilizzo e riciclo al minimo. Inoltre, vi sono da considerare aspetti legati ai temi della salute umana e ambientale e della sicurezza poiché effettuando demolizioni non selettive si incrementa il rischio di non trattare adeguatamente le sostanze tossiche.

[56] Bilal, M., Khan, K. I. A., Thaheem, M. J., & Nasir, A. R. (2020). Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework. Journal of Cleaner Production, 276, 123250.
[57] Hedberg, A., & Šipka, S. (2020). The circular economy: Going digital. European Policy Center.

Il volume dell'edificio, la sua estetica, i materiali e il loro impatto ambientale, le operazioni necessarie alla sua manutenzione sono fattori che vengono discussi nella fase iniziale di progettazione. Raramente, in questa fase, vengono trattate questioni in merito alla *End of Life* (EoL) del manufatto edilizio e dei suoi componenti, trascurando le possibilità che offre il *Design for Deconstruction*.

Quando si parla di *Design for Enviroment* (DfE), si intende la progettazione relativa agli impatti sulla salute delle persone e dell'ambiente durante il ciclo-vita di un prodotto. Il DfE comprende molti sottoinsiemi, tra cui il *Design for Deconstrution*, il riutilizzo e il riciclaggio.
Il *Design for Deconstruction* è parte integrata di qualsiasi progetto che intende massimizzare l'utilizzo e la conservazione dei materiali scelti per la costruzione al fine di creare edifici adattabili.
Con questo metodo si possono ottenere diversi benefici ambientali, tra cui la conservazione dell'*embodied energy* [58], la riduzione delle emissioni di carbonio e la riduzione dell'inquinamento.

[58] Catarina Thormark. (2001). Assessing the recycling potential in buildings. CIB Task Group 39: Deconstruction and Materials Reuse: Technology, Economic, and Policy., 78–86.

È stato stimato che grazie al DfD si può ottenere un risparmio di *embodied carbon* pari al 49% [59]. Inoltre, il DfD genera un'offerta di nuovi posti di lavoro per operai non qualificati, provoca un abbassamento dei costi e sviluppa un nuovo mercato per i materiali di recupero, attualmente non vantaggioso. [60]
Solamente al termine dell'edificazione della costruzione si possono prevedere i costi della manodopera e tutti i costi inerenti alle operazioni, di conseguenza una valutazione del profitto economico del DfD non è facile da preventivare. [61]
I problemi di smaltimento di grandi quantità di beni e gli impatti ambientali inquinanti che ne derivano, ma soprattutto la perdita di materiale, risorse ed energia che è racchiusa in questi prodotti hanno guidato lo sviluppo del concetto di *Design for Deconstruction*.
Questo è un concetto dapprima in crescita all'interno dell'industria manifatturiera poiché vi è stata una crescente attenzione alla gestione del ciclo completo della vita di un prodotto,

[59] Densley Tingley, D. (2013). Design for Deconstruction: an appraisal [PhD thesis]. University of Sheffield.
[60] Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Procedia Engineering, 118, 1296–1304.
[61] Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management, 60, 3–13.

compreso quello che succede dopo la cessazione del suo utilizzo.
In Europa, la produzione di rifiuti e l'inquinamento legato a essa iniziarono a essere regolamentati con vincoli attraverso una serie di legislazioni sull'estensione della responsabilità riversata completamente sul produttore dell'intero ciclo vita del prodotto, come la Direttiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo sui veicoli fuori uso.
Riassumendo il concetto sopra descritto: chi crea un prodotto è responsabile del suo intero ciclo-vita, includendo le ultime fasi come il riuso e il riciclo.

Dato che gli edifici possono essere considerati come manufatti costituiti dalla combinazione di elementi preassemblati in loco o altrove, il DfD può essere applicato al mondo dell'edilizia. Sebbene non siano tipicamente considerati come "prodotti", gli edifici sono comunque un insieme di materiali, componenti e connessioni, e sono realizzati grazie alla collaborazione di progettisti, ingegneri, professionisti e produttori dei materiali e dei componenti.
Il DfD applicato al settore edile è diventato un *hot topic* nella progettazione sostenibile grazie al diffuso interesse verso l'EC: "un modello economico che disaccoppia gradualmente l'attività economica dal consumo di risorse limitate e mira a progettare i rifiuti fuori dal sistema". [62]

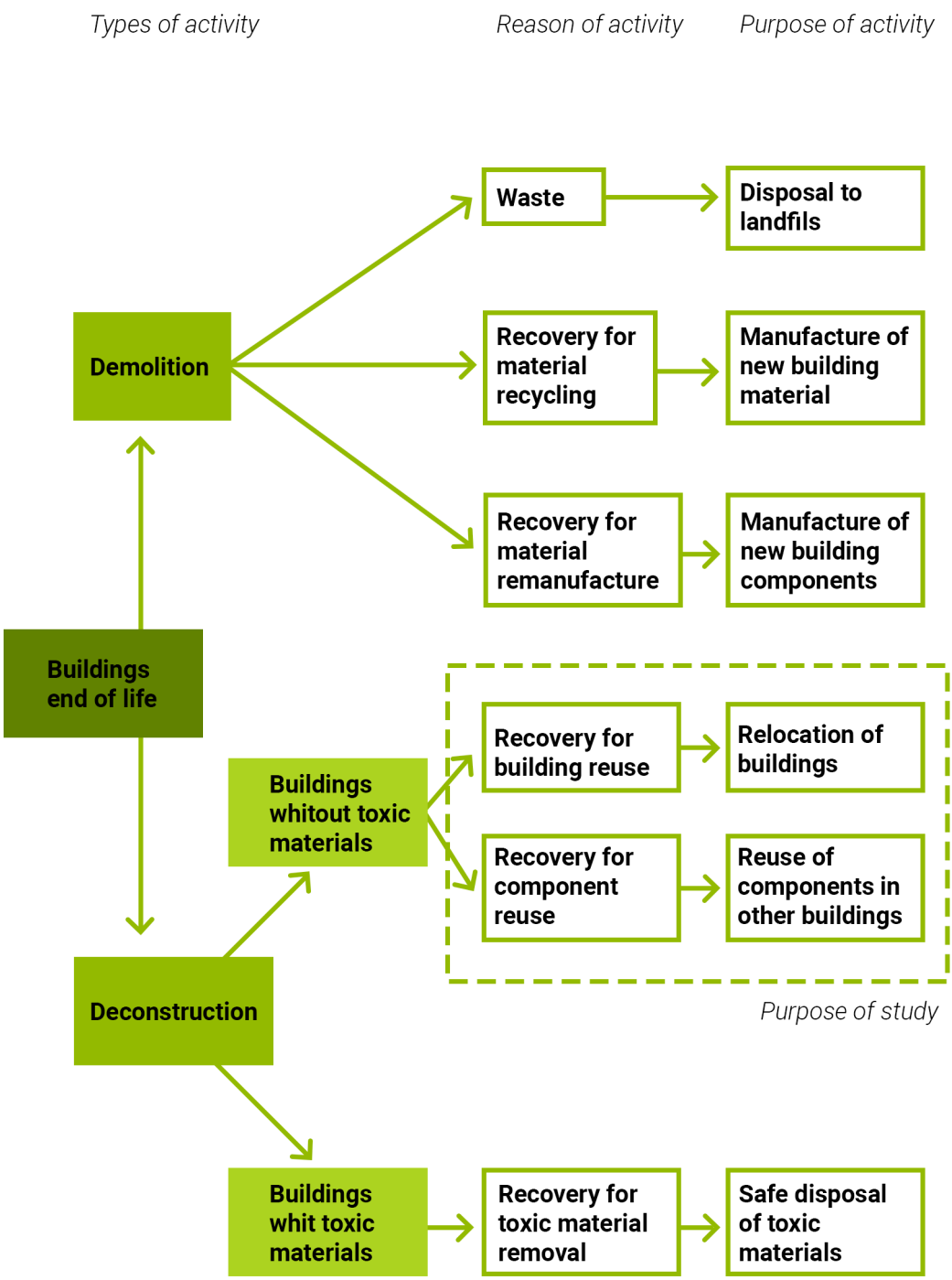
A causa della loro importanza nella società e dell'enorme impatto sull'utilizzo delle risorse a livello globale, qualsiasi tentativo di considerare la sostenibilità nell'uso delle risorse relative agli edifici deve considerare la gestione di tutti i flussi di risorse nel pieno ciclo di vita.
Una delle principali distinzioni che viene effettuata per distinguere la metodologia della costruzione di edifici è il predominio dell'assemblaggio, che può essere a secco o bagnato.
Quest'ultimo, per il quale viene spesso utilizzato il calcestruzzo gettato in opera, non si presta facilmente alla separazione per un eventuale riutilizzo.

La progettazione per il disassemblaggio ha lo scopo di creare edifici riducendo il consumo di materiali e gli sprechi durante la costruzione, ristrutturazione e demolizione, per aumentare la vita degli edifici stessi ma soprattutto per creare dei "magazzini" di materiali per le costruzioni future.
Oggi, meno del 1% degli edifici esistenti è completamente smontabile [63] e il design per la decostruzione non risulta essere una tipologia di progettazione tradizionale.

[62] Kanters, J. (2018). Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. Buildings, 8(11), 150.
[63] Schultmann, F., & Chini, A. R. (2002). Design for deconstruction and material reuse. Proceedings of the CIB Task Group 39 - Deconstruction Annual Meeting, Karlsruhe 2002. CIB, International Council for Research and Innovation in Building Construction.

Figura 153: Tipi e finalità del fine vita degli edifici.

Fonte: produzione propria basata su "Akinade, O. O. et al. 2017. Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management."


Types of activity
Reason of activity
Purpose of activity
Buildings end of life
Demolition
Waste
Disposal to landfils
Recovery for material recycling
Manufacture of new building material
Recovery for material remanufacture
Manufacture of new building components
Buildings whitout toxic materials
Recovery for building reuse
Relocation of buildings
Recovery for component reuse
Reuse of components in other buildings
Purpose of study
Deconstruction
Buildings whit toxic materials
Recovery for toxic material removal
Safe disposal of toxic materials

Problemi della progettazione attuale

Ci sono vari problemi comuni che sono diventati il filo conduttore nella progettazione e nella costruzione degli edifici fino ad oggi.
Si usano prodotti ingegnerizzati difficili da riciclare a causa della loro complessità chimica e la scelta di affidare i rivestimenti e l'incapsulamento di elementi a innumerevoli strati di materiali di finitura al posto di un involucro integrale rendono i costi di manodopera per la decostruzione elevati. Inoltre, in questo modo viene reso complesso il trattamento dei materiali recuperati che sono mischiati e difficili da separare, anche perché vengono predilette tecniche di connessione come chiodi e adesivi chimici che sono complicati da "smontare".
Secondo la *Building Materials Reuse Association*, l'ostacolo più citato alla decostruzione è stato di gran lunga il tempo di decostruzione con bassi costi di smaltimento. [64]

Un progettista non può controllare i costi legati allo smaltimento dei rifiuti da costruzione, ristrutturazione e demolizione ma con una pro-

[64] Echols, A., & Guy, B. (2004). Survey of Attendees. Building Materials Reuse Association Conference, Oakland , CA, United States of America.
[65] Durmisevic, E., & Yeang, K. (2009). Designing for Disassembly (DfD). Architectural Design, 79(6), 134–137.

gettazione adeguata (DfD) può efficientare il processo di disassemblaggio.
I progettisti devono effettuare uno sforzo nel concepimento innovativo dell'edificio inteso come prodotto decostruibile. [65]

3.2.1 Metodologia applicativa del *DfD*

Il *Design for Deconstruction* è una metodologia di progettazione applicabile agli edifici per favorirne le modifiche future e l'eventuale smantellamento per il recupero di materiali, sistemi, elementi e componenti. Questo processo di progettazione verte a sviluppare tecniche costruttive, sistemi informativi e di gestione per raggiungere gli obiettivi prima citati, eliminando le pratiche di demolizione tradizionali [66].
Il recupero dei materiali ha lo scopo di massimizzare il valore economico e ridurre al minimo l'impatto ambientale attraverso il loro successivo riutilizzo, riparazione e rigenerazione. [67]
Il DfD consente la flessibilità e la convertibilità degli edifici progettati. In questo modo, se fosse necessaria, verrebbe facilitata la rimozione puntuale di parti di edificio.

[66] Gorgolewski, M. (2008). Designing with reused building components: some challenges. Building Research &Amp; Information, 36(2), 175–188.
[67] Durmisevic, E., & Yeang, K. (2009). Designing for Disassembly (DfD). Architectural Design, 79(6), 134–137.

Dieci principi chiave del DfD

[68,69,70,71,72,73]

Documentare materiali e metodi per la decostruzione.

Il Design as-built , l'etichettatura di connessioni e materiali e un "piano di smantellamento" contribuiscono allo smontaggio e alla demolizione efficienti.

Selezionare i materiali secondo il principio di precauzione.

Bisogna tenere conto degli impatti futuri selezionando prodotti di elevata qualità capaci di mantenere il proprio valore e di essere facilmente riutilizzabili e riciclabili.

Intercambiabilità.

L'uso di materiali e sistemi che esibiscono principi di modularità, indipendenza e standardizzazione ne faciltano il riutilizzo.

Ridurre al minimo o eliminare le connessioni chimiche.

Leganti, sigillanti e colle su, o nei materiali, li rendono difficili da separare e riciclare e aumentano il potenziale di impatti negativi sulla salute umana ed ecologica.

Sistemi meccanici, elettrici e idraulici (MEP) separati.

Districando i sistemi MEP dai componenti che li ospitano risultano più agevoli la riparazione, la sostituzione, il riutilizzo e il riciclaggio dei singoli elementi.

[68] Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management, 60, 3–13.
[69] Densley Tingley, D. (2013). Design for Deconstruction: an appraisal [PhD thesis]. University of Sheffield.

Semplicità strutturale e formale.

Sistemi strutturali semplici a campata aperta, forme semplici e griglie dimensionali standard consentono facilità di costruzione e smontaggio.

Progettare connessioni accessibili.

Le connessioni visivamente, fisicamente ed ergonomicamente accessibili aumentano l'efficienza ed evitano la necessità di apparecchiature costose o di ampie protezioni per la salute e la sicurezza dell'ambiente per i lavoratori.

Decostruzione sicura.

Consentire il movimento e la sicurezza dei lavoratori, delle attrezzature e dell'accesso al sito e la facilità del flusso dei materiali rendono i lavori di ristrutturazione e smontaggio più economici e riducono i rischi.

Utilizzare collegamenti imbullonati, avvitati e inchiodati.

L'uso di tavolozze di connettori standard riduce la necessità di strumenti, il tempo e lo sforzo per eseguire la procedura di smontaggio.

Progettazione a scala umana e del lavoro di separazione.

I componenti in scala umana e l'adattamento alla facilità di rimozione mediante apparecchiature meccaniche standard diminuiscono l'intensità del lavoro e aumentano l'abilità degli operai .

[70] Crowther, P. (2005). Design for Disassembly - Themes and principles. Environment Design Guide.
[71] Building a Circular Future (3rd ed.). (2016). Danish Environmental Protection Agency.
[72]Guy, B., & Ciarimboli, N. (2005). Design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Pennsylvania State University: University Park.
[73] Sassi, P. (2008). Defining closed-loop material cycle construction. Building Research &Amp; Information, 36(5), 509–519.

Criticità nell'applicazione del DfD

Lo studio effettuato da Akinade e colleghi, (2017) nell'articolo "Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills" ha identificato le problematiche più evidenti che ostacolano l'utilizzo di DfD. In primo luogo vi è una diffusa credenza che l'EoL possa non verificarsi per molto tempo generando così disinteresse nei progettisti e negli utenti. Oltre a questo ostacolo di natura culturale vi sono problematiche tecniche come la limitata presenza di strumenti di supporto e una scarsa conoscenza nel settore edile di queste tematiche.
Infine, non vi è alcuna garanzia in merito al valore dei materiali edili a fine vita a causa del degrado dovuto dall'utilizzo e dell'obsolescenza.
I materiali recuperati dalla decostruzione sarebbero una risorsa economica se il mercato edile ne maturasse la domanda, questa incertezza disincentiva la pratica di DfD.
Il vantaggio finanziario non è semplice da calcolare poiché la conoscenza pregressa è limitata ed è necessario tenere in considerazione la presenza di variabili come i costi aggiuntivi di manutenzione. [74]

[74] Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management.

Rios, Chong e Grau (2015) in “Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities” hanno riscontrato inoltre un’incertezza in merito alla quantità di materiale che nello scenario di fine vita può essere riutilizzata a causa anche del danneggiamento durante il processo di decostruzione. L’assenza di una legislazione accurata, di incentivi e di una metodologia che quantifichi i benefici economici ed ambientali disincentiva la pratica del *Design for Decostruction*.

Entrambe le fonti citate descrivono come ci siano ancora delle percezioni negative che rallentano il processo di diffusione del DfD come: la sfiducia dell’utente finale verso i materiali riusati, la convinzione che i costi di smontaggio superino quelli di demolizione e smaltimento, la concezione da parte dei progettisti del bene immobile come manufatto permanente. [75]

[75] Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Procedia Engineering, 118, 1296–1304.

Strategie per una corretta applicazione del DfD

L'edificio deve avere la capacità di essere adattabile e dinamico mediante una struttura capace di mutare con il tempo. L'intero ciclo vita del sistema edilizio deve essere concepito in base alla capacità di trasformazione della struttura.
Per far sì che questo principio si realizzi i materiali da costruzione devono essere trattati come beni preziosi a lungo termine, scelti in base a un'idea di ripianificazione e rigenerazione. I materiali da costruzione che concludono la loro vita come rifiuti sono un grande errore di progettazione.
Analizzando dettagliatamente le strategie per un DfD efficace, durante la progettazione viene principalmente effettuato un focus sui materiali e sul tipo di connessioni utilizzati.
Bisogna evitare materiali tossici e pericolosi che aumentano i potenziali impatti sulla salute umana e sull'ambiente e sui costi di gestione, preferendo i materiali riutilizzati di alta qualità e possibilmente limitandone al minimo la tipologia. Questo ridurrebbe la complessità e il numero di processi di separazione. [76]
In merito agli elementi di fissaggio, come i tipi di materiale, ne vanno ridotte al minimo le quantità per aumentare la velocità di smontaggio e progettarli così che possano resistere per ripetuti cicli di montaggio-smontaggio.

I connettori inoltre devono essere facilmente accessibili evitando di essere coperti da finiture secondarie. Per quanto riguarda la struttura, si predilige una griglia strutturale modulare che favorisca l'utilizzo dei componenti di dimensioni standard [77].

Un'ottima strategia è quella di separare la struttura dal rivestimento consentendone una maggiore adattabilità e permettendo una decostruzione strutturale separata da quella non-strutturale. Grazie anche questa metodologia, più parti di edificio possono essere disassemblate contemporaneamente per velocizzare il lavoro. Infine, le fondamenta e la struttura stessa vanno progettate sovradimensionate per consentire in futuro la sopraelevazione, preferibile rispetto alla demolizione meno sostenibile.

Pianificare l'edificio in base alla durata della vita degli elementi e lo sviluppo della costruzione, contemporaneamente alla sua futura decostruzione, sono i principi fondamentali per capire come avverrà la decostruzione fisica.

La prefabbricazione renderà più agevole la costruzione grazie all'utilizzo di giunti a secco.

[76] Guy, B., & Ciarimboli, N. (2005). Design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Pennsylvania State University: University Park.

[77] Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management, 60, 3–13.

L'origine della prefabbricazione

La prefabbricazione, nata come metodologia per velocizzare la costruzione, è uno strumento a servizio del DfD che garantisce facilità e precisione nello smontaggio.
La nascita della prefabbricazione è riconducibile al XVI secolo quando la colonizzazione inglese generò la richiesta di costruire rapidamente gli insediamenti. Non conoscendo le metodologie costruttive e i materiali a disposizione nei nuovi territori, gli inglesi iniziarono a prefabbricare elementi costruttivi da esportare.
Nel 1830, H. John Manning progettò un cottage "portatile" attraverso la realizzazione di strutture lignee ed elementi di riempimento standardizzati e intercambiabili con la possibilità di assumere diverse destinazioni d'uso [78]. Solo sul finire della Seconda Guerra Mondiale si assiste all'utilizzo massivo della prefabbricazione al fine di ricostruire velocemente ed economicamente il tessuto edilizio perduto o danneggiato. Vi era necessità di realizzare interi quartieri, ponti, viadotti autostradali e ferroviari. Questi primi tentativi di prefabbricazione nel campo edile hanno fatto emergere molte criticità connesse soprattutto alla mancanza di strumentazione, studi e supporti adeguati, portando al temporaneo abbandonata di questa procedura. [79]

[78] Manning, H. J. (1830). The Portable Cottage. Inghilterra.
[79] Manghi, E. (2021). Architettura modulare prefabbricata [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino.

3.2.2 *Design process*

Per raggiungere gli obiettivi del *Design for Deconstruction* bisogna considerare tutti gli *step* del processo progettuale. Genericamente sono cinque e comprendono il *pre-design*, il *concept-design*, lo *schematic design*, il *design development* e infine i *construction documents* [80].

Generalmente, la fase del *pre-design* è considerata ottimale per effettuare studi relativi al DfD e fare considerazioni sul ciclo vita dell'edificio, oltre a sviluppare le analisi del sito, impostare obiettivi ambientali e programmare l'edificio [81]. Definire gli obiettivi del DfD nella fase iniziale della progettazione porterà a un design degli interni, della struttura e dei servizi che permettano un adattamento e una modifica efficienti nel tempo riducendo la quantità di rifiuti nella manutenzione e a fine vita. Inoltre, la valutazione delle caratteristiche del sito, il budget della committenza, la funzione dell'edificio faranno emergere meglio gli obiettivi finali.

[80] Guy, B., & Ciarimboli, N. (2005). Design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Pennsylvania State University: University Park.
[81] Kanters, J., & Horvat, M. (2012). The Design Process known as IDP: A Discussion. Energy Procedia, 30, 1153–1162.

Per ottimizzare l'uso di questa metodologia si devono svolgere analisi sul costo del ciclo vita basati prima sull'uso dell'edificio al momento attuale e in seguito considerando l'arco di vita per il quale esso è progettato. Bisogna tenere in considerazione che i disegni costruttivi degli edifici progettati con DfD, rispetto a quelli normali, necessitano di uno sforzo maggiore in quanto il livello di dettaglio deve essere più accurato. Questo procedimento è stato facilitato dai software tridimensionali con i quali è inoltre possibile modellare chiaramente sia la sequenza di costruzione che quella di decostruzione e eventualmente di manutenzione.

Fase di pre-progettazione:

Gli elementi interni, il sistema dei servizi e la struttura devono essere progettati in modo tale che siano possibili modifiche future.

Fase di concept design

Il progettista insieme all'appaltatore incontra i fornitori per identificare i materiali riutilizzati che supportano DfD.

Fase di progettazione schematica

Il progetto viene verificato producendo un piano da decostruire l'edificio.

Fase di sviluppo progettuale

Elaborazione di un piano dettagliato per la decostruzione dell'edificio eseguito.

Documentazione della costruzione

Deve essere assicurato che i dettagli non compromettano l'integrità del DfD e che la documentazione rifletta l'impegno per una costruzione DfD. Devono inoltre essere creati un insieme di documenti "as built".

Fase di manutenzione

I servizi operativi della struttura dovrebbero informare tutto il personale di manutenzione sulla strategia DfD dell'edificio.

Figura 154: DfD durante i processi di progettazione.

Fonte: produzione propria basata su "Guy, B., & Ciarimboli, N. (2005). Design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Pennsylvania State University: University Park."

I ruoli principali nel processo di riutilizzo

Designer – La loro documentazione, disegni e istruzioni influiscono in modo significativo sullo sforzo necessario nella demolizione dell'edificio. Non solo i componenti e le tecnologie selezionati sono importanti, ma anche il modo in cui sarà garantita la disponibilità della documentazione progettuale definitiva per l'intero ciclo di vita dell'edificio. La massimizzazione del valore ambientale, culturale ed economico al termine della vita dell'edificio va considerata già in fase di progettazione.

Proprietari e investitori – Un progetto di riutilizzo può avere successo solo quando è pienamente supportato dal proprietario dell'edificio o dall'investitore. La dimostrazione di casi di successo dovrebbero essere il modo per aumentare la motivazione degli investitori.

Materie prime – La crescente domanda di materiali da costruzione sta esercitando una forte pressione sulle risorse naturali. Inoltre, le materie prime stanno diventando scarse e più costose.

Produttori di materiale – La materia prima e nella maggior parte dei casi anche i rifiuti recuperati vengono utilizzati per produrre nuovo materiale da costruzione venduto direttamente ai fabbricanti.

Centri di servizio – Agiscono come intermediari tra i produttori e i fabbricanti e gli utenti effettuando l'inventario e la distribuzione.

Fabbricanti ed erettori – Fabbricano i singoli componenti, alcuni costruttori hanno anche le proprie squadre di montaggio, altri subappaltano l'erezione ad organizzazioni indipendenti.

Edifici – Il numero crescente di progetti mostra con successo come i componenti di un vecchio edificio o struttura possano essere riutilizzati in un nuovo edificio, riducendo così l'impatto ambientale, ma la comunicazione di tali casi di successo ai professionisti dell'edilizia non è al momento sufficiente.

Demolizione - Le attuali pratiche di rimozione degli edifici significano principalmente un processo di demolizione distruttiva da parte di macchinari pesanti. Si ha la percezione che l'estrazione manuale di elementi edilizi dagli edifici per il riutilizzo comporti problemi e costi aggiuntivi.

Smontaggio – Il riutilizzo dei componenti può essere massimizzato solo quando viene effettuato un accurato smontaggio. Il volume di componenti smontabili aumenterà con l'aumentare della domanda.

Cantieri di recupero – I cantieri di recupero immagazzinano elementi da costruzione per il riutilizzo e il riciclaggio. Alcuni cantieri di salvataggio estrarranno componenti quando ne riconosceranno il potenziale riutilizzo.

Rivenditori di materiali – i rivenditori vendono materiali di scarto per il riciclaggio e il riutilizzo.

Codici di progettazione – i vantaggi del riutilizzo possono essere notevolmente migliorati se i codici edilizi enfatizzano gli aspetti ambientali della costruzione e offrissero ai progettisti maggiori opportunità di approvvigionamento dei materiali.

Strumenti di progettazione – L'area in rapido sviluppo dei software di progettazione è attualmente in grado di offrire molti strumenti utili per l'ottimizzazione ambientale degli edifici. Poiché i componenti degli edifici vengono riutilizzati fisicamente, possono essere riutilizzati anche digitalmente. L'implementazione di Building Information Model (BIM) è essenziale per gestire il trasferimento regolare degli elementi dell'edificio tra due diversi progetti.

3.2.3 Applicazione del DfD al caso studio Circular Tower

La Circular Tower è stata progettata seguendo i principi fondamentali del Design for Deconstruction.
La maggior parte delle lavorazioni devono essere svolte in officina, producendo elementi finiti, i quali verranno spediti e posati in cantiere tramite i collegamenti a secco predisposti in fase di progetto. Questo iter permette di velocizzare il montaggio e rendere facile la decostruzione per eventuali manutenzioni e per lo smantellamento alla fine del ciclo vita dell'edificio.
La costruzione della Circular Tower avviene piano per piano, posando prima i pilastri, successivamente le travi primarie e infine i solai e le pareti prefabbricati. Questi ultimi hanno entrambi la funzione di irrigidimento dei piani relativamente orizzontale e verticale.
Nel paragrafo seguente è riportato un approfondimento sulla posa dei pannelli prefabbricati del solaio e della struttura portante.

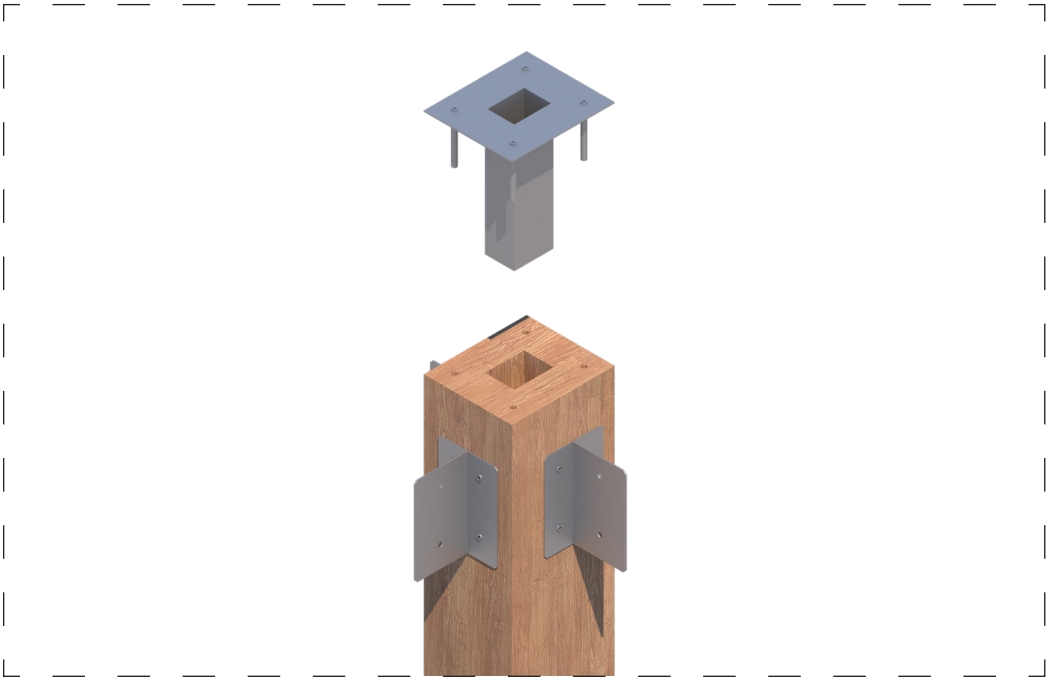
Figura 155: Pilastro strutturale con incastro e staffe a scomparsa.

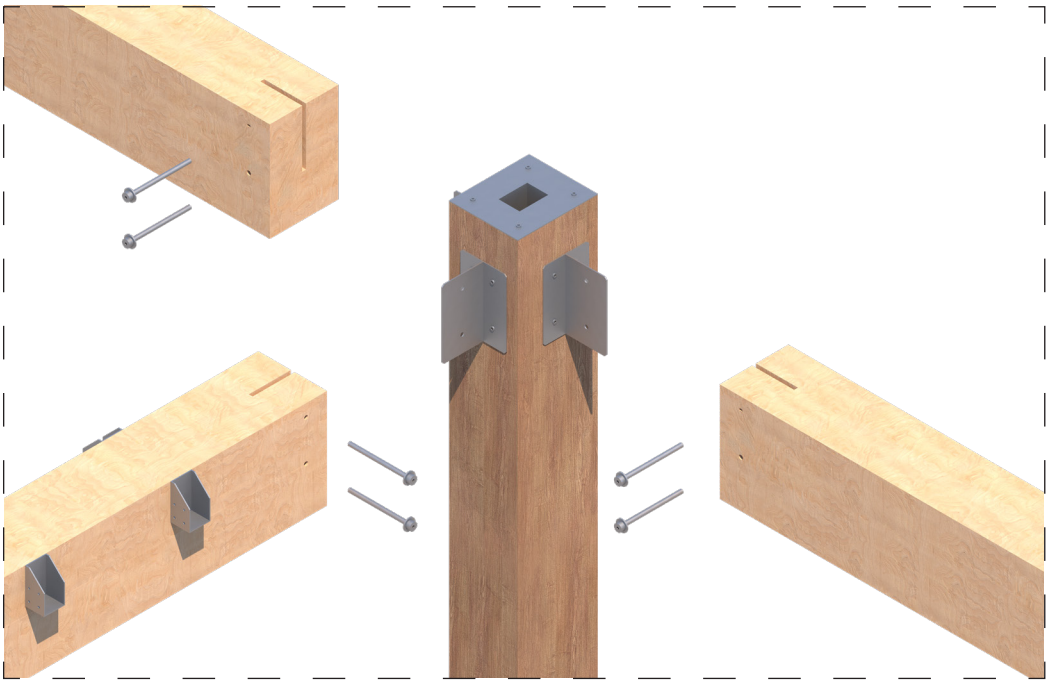
Fonte: Elaborazione propria.

Figura 156: Fissaggio delle travi al pilastro tramite bullonatura.

Fonte: Elaborazione propria.

I pilastri lignei di altezza 390 cm si presentano in una soluzione di continuità permessa da una giunzione maschio-femmina realizzata mediante elementi di acciaio. Alla sommità dell'elemento verticale portante è presente una sede che ospiterà un giunto ad incastro. (Figura 155)





Descrivendo l'ordine di montaggio, i pilastri di sezione 36 x 42 cm, saranno il primo elemento della struttura portante ad essere posato sopra le fondamenta. Inizialmente, la struttura composta dai pilastri verrà irrigidita tramite la posa delle travi primarie.

Per effettuare la posa delle travi è necessario dapprima imbullonare una piastra a scomparsa all'elemento verticale [82]. La predisposizione di fessure agli estremi della trave permetterà così il suo conseguente inserimento nella piastra. Seguirà un ulteriore fissaggio tramite bulloni. (Figura 156)

Al fine di garantire un efficace Design for Deconstruction e per garantire rapide tempistiche di posa in cantiere, gli elementi dell'involucro e i solai interpiano si presentano come elementi prefabbricati.

La pavimentazione, il pannello in gessofibra, i pannelli isolanti in fibra di legno e il massetto composto da pannelli in legno mineralizzato che compongono il solaio sono assemblati a secco in officina. L'elemento solaio viene completato attraverso l'aggiunta di un pannello in legno lamellare al quale sono fissati i travetti in LVL (10 x 18 cm) al fine di realizzare la componente portante secondaria di irrigidimento del piano orizzontale (Figura 157).

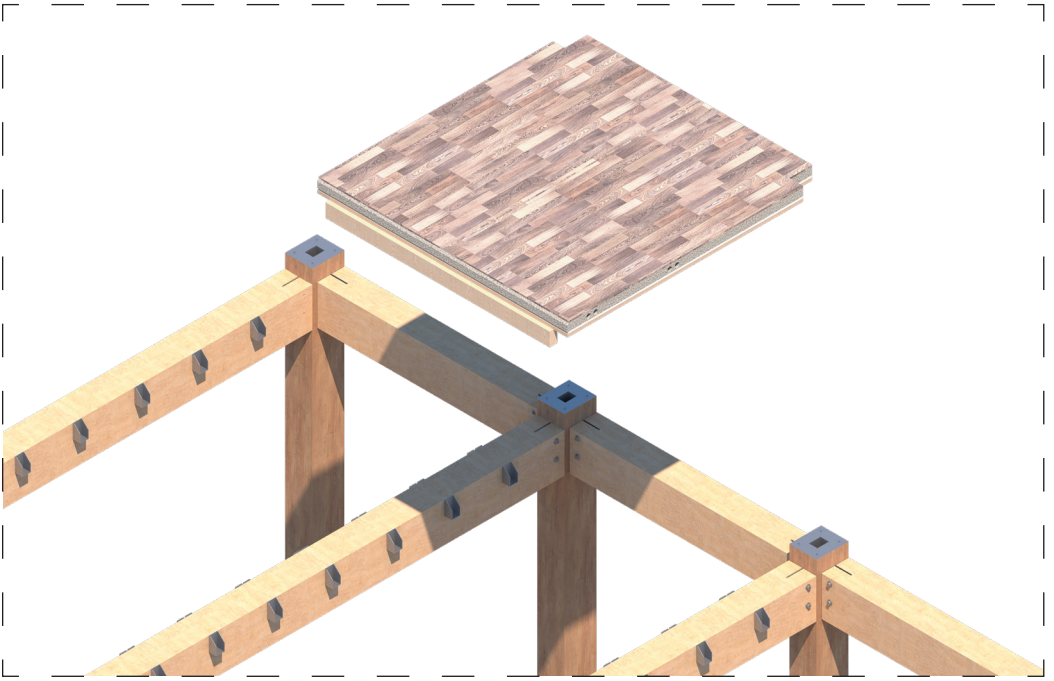
Figura 157: Posa dei solai prefabbricati.

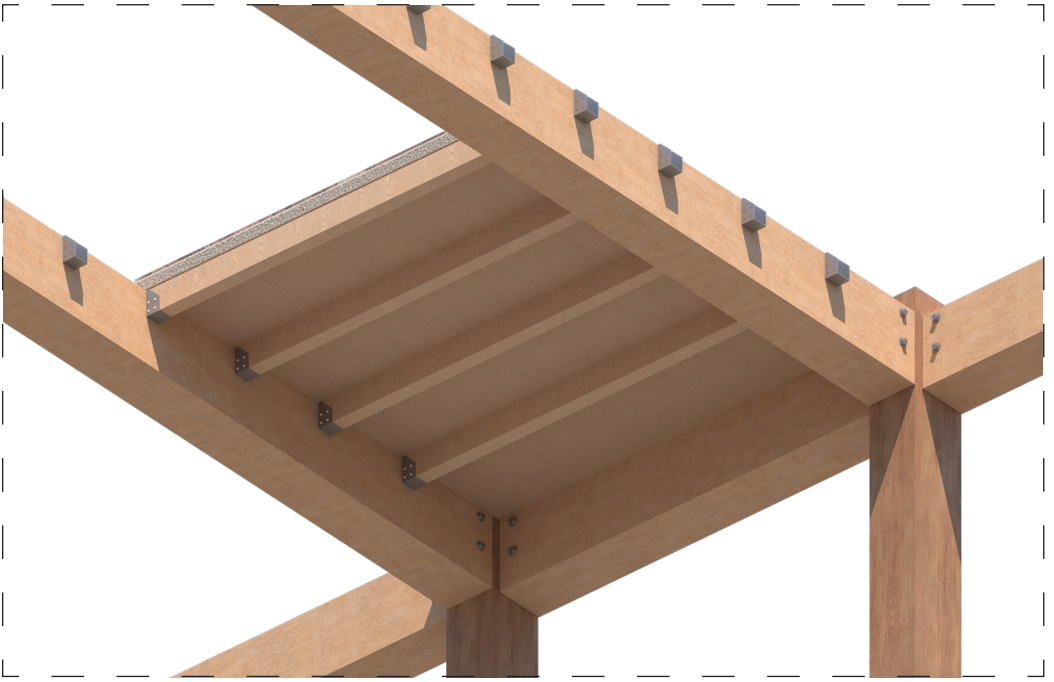
Fonte: Elaborazione propria.

Figura 158: Solaio fissato tramite scarpe metalliche.

Fonte: Elaborazione propria.

[82] Piastre e connettori per legno. (2019). In Rothoblaas. Rothoblaas. https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/piastre-e-connettori





I travetti svolgono un ruolo fondamentale non solo a livello strutturale, consentono infatti il fissaggio dei solai prefabbricati alla struttura portante tramite scarpe metalliche ad ali interne [83] . (Figura 158).
L'applicazione dei principi di DfD avviene anche attraverso la scelta di prodotti commerciali, aventi misure standardizzate e realizzati in pannelli.
L'elemento solaio, diventato ora un componente prefabbricato, ha una dimensione di 330 x 330 cm, e ha uno spessore, escludendo i travetti, di 18 cm. (Figura 159)

Figura 159: Completamento della posa dei solai prefabbricati.

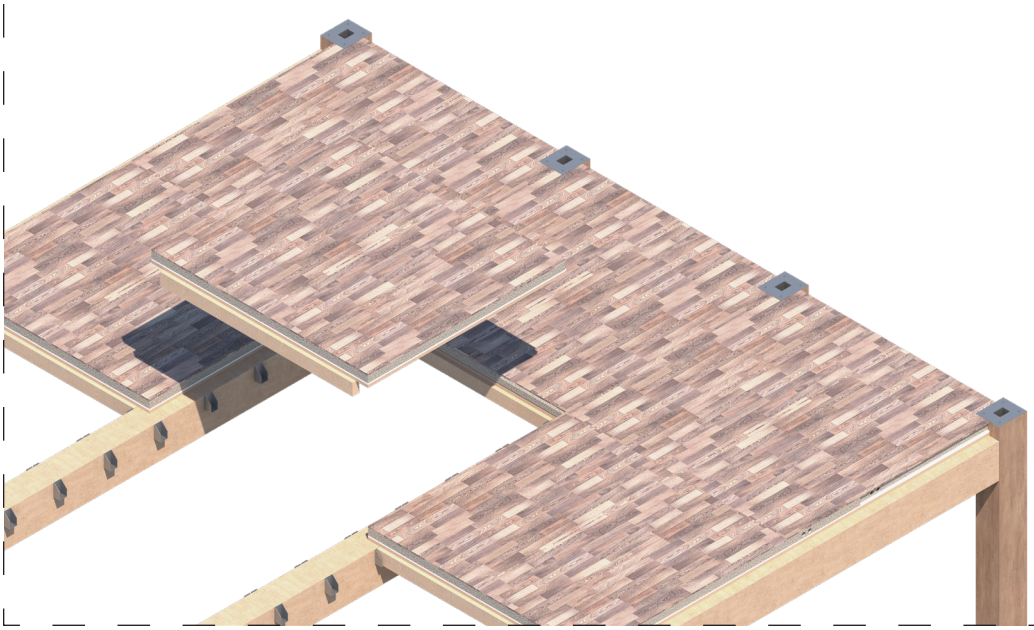
Fonte: Elaborazione propria.

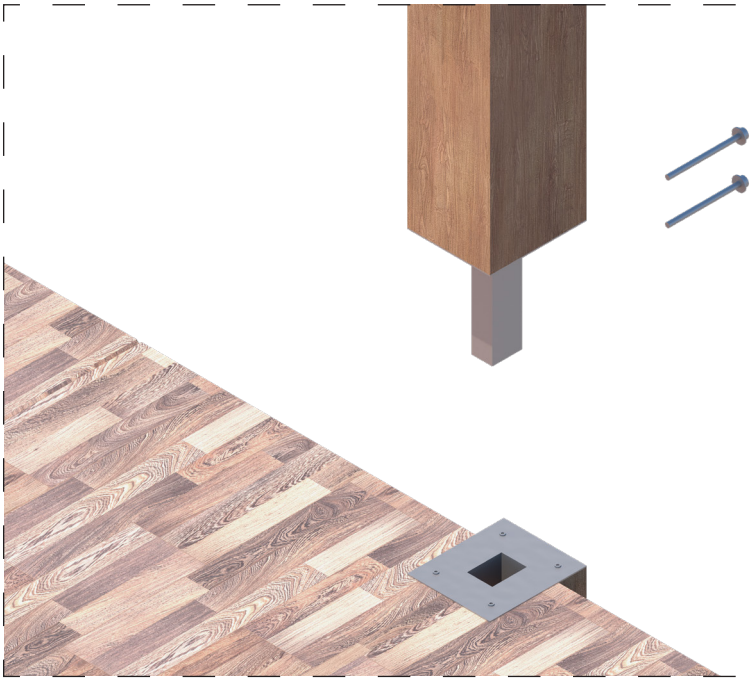
Una volta terminata la posa dei solai, è possibile progredire con la posa dei pilastri del piano successivo. Per approfondire il sistema di collegamento verticale tra i pilastri (Figura 160), si descrive la forma quadrata dell'elemento d'acciaio, per evitare fenomeni di rotazione. Il giunto è ulteriormente fissato con delle bullonature per evitare lo spostamento verticale. Il pilastro è posato a una distanza di 18 cm dalle travi. Questa distanza rappresenta l'altezza dei solai prefabbricati che sono stati precedentemente fissati alla struttura. In questo modo i pilastri verranno posizionati complanari alla pavimentazione del piano.

Figura 160: Posa del pilastro tramite incastro.

Fonte: Elaborazione propria.

[83] BSI, scarpe metalliche ad ali interne. (2019). Rothoblaas. https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/piastre-e-connettori/scarpe-metalliche/bsi





3.3 Scenari di fine vita dei materiali e dei componenti del manufatto edilizio

Come precedentemente descritto la progettazione ha un ruolo chiave nello scenario di fine vita del manufatto edilizio determinandone il potenziale di riutilizzo dei suoi componenti connesso alla relativa riduzione del carico ambientale. Il DfD che permette la decostruzione selettiva da luogo a diversi scenari di fine vita dei materiali edili tra cui il riciclaggio, il riuso e lo smaltimento.

Il principio delle 3R (ridurre, riutilizzare e riciclare) richiede l'applicazione di metodi alternativi al tradizionale smaltimento. Il termine ridurre si riferisce al consumo di risorse ed energie e alla produzione di rifiuti. Il riutilizzo mira all'estensione della vita utile del bene. Infine, con riciclare si intende la rielaborazione del prodotto in MPS per la produzione di nuovi materiali. [84]

[84] Sung, K., Cooper, T., & Kettley, S. (2014). Individual upcycling practice: exploring the possible determinants of upcycling based on a literature review. Sustainable Innovation.

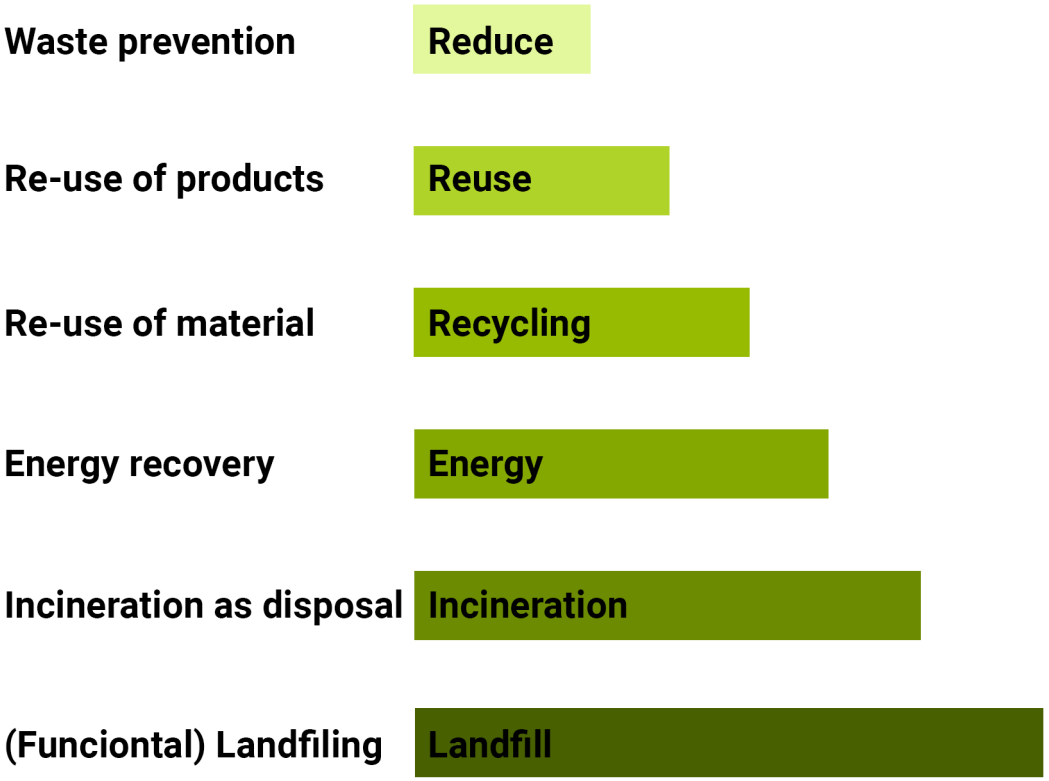


Figura 161: La gerarchia della gestione dei rifiuti.

Fonte: Lansink, A. (2018). Challenging Changes – Connecting Waste Hierarchy and Circular Economy. International Solid Waste Association, 36(10).

Riutilizzo

Il riutilizzo dei materiali disassemblati è l'azione più virtuosa, in termini di consumo energetico e generazioni di emissioni, poiché la vita utile è prolungata e l'impatto ambientale generato per la produzione è distribuito su un arco temporale maggiore, limitando la domanda di nuovi prodotti aventi le medesime funzionalità.
Rispetto al processo di riciclaggio, il riutilizzo di un componente richiede un impiego minore di energia, necessaria per trasportarlo nel nuovo sito di utilizzo ed eventualmente ripristinarlo

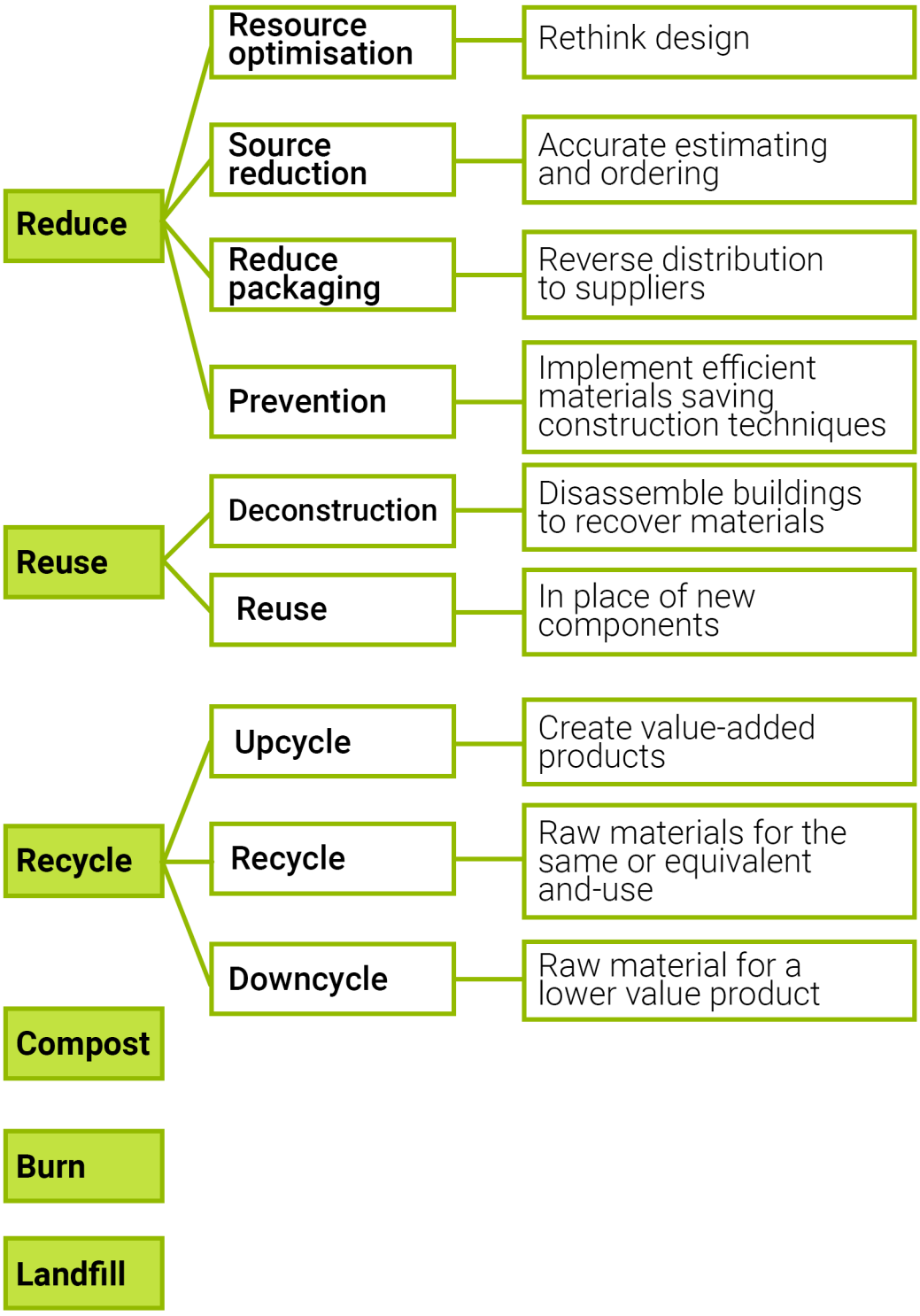

Reduce
Resource optimisation
Rethink design
Source reduction
Accurate estimating and ordering
Reduce packaging
Reverse distribution to suppliers
Prevention
Implement efficient materials saving construction techniques
Reuse
Deconstruction
Disassemble buildings to recover materials
Reuse
In place of new components
Recycle
Upcycle
Create value-added products
Recycle
Raw materials for the same or equivalent and-use
Downcycle
Raw material for a lower value product
Compost
Burn
Landfill

Figura 162: Possibili scenari di fine vita dei materiali edili.

Fonte: Elaborazione propria.

attraverso processi di manutenzione. Si può ridurre così la quantità di rifiuti prodotti da C&D [85] conservando tutta l'energia incorporata spesa per estrarre, trasportare ed elaborare le materie prime [86].
Ripristinare un prodotto in una condizione funzionale per generarne un utilizzo alternativo permette di deviare un elevata quantità di rifiuti dalla discarica [87]. Il reimpiego è quindi un processo mediante il quale un prodotto con un valore d'uso viene trasformato o ridistribuito come oggetto con un valore d'uso alternativo. [88]

Un limite riscontrato nella pratica del riutilizzo è la percezione da parte dei consumatori. Spesso i prodotti riutilizzati sono considerati di pregio inferiore, antiestetici, con proprietà fisiche-meccaniche ridotte, il che non è sempre vero. [89]

[85] Peng, C. L., Scorpio, D. E., & Kibert, C. J. (1997). Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. Construction Management & Economics, 15(1), 49–58.
[86] BioRegional Development Group. (2012). Reuse and recycling on the London 2012 Olympic Park: Lessons for demolition, construction and regeneration.
[87] Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. Energy, 34(12), 2116–2123.
[88] Michael Martin, & Amin Parsapour. (2012). Upcycling wastes with biogas production: An exergy and economic analysis. Venice 2012: International Symposium on Energy From Biomass and Waste.

L'accettazione sociale per il riutilizzo dei materiali ottenuti dalla C&D dunque rappresenta una barriera significativa.

Riciclaggio

Il riciclaggio è un attività di recupero dei rifiuti mediante processi chimici e fisici che richiedono impiego di energia sotto forma di trasporto, nonché nei processi di riciclaggio stessi. [90]
I processi di riciclaggio applicati ai prodotti giunti al termine della loro vita utile possono giungere alla trasformazione *upcycled* oppure *downcycled*.
Quando un rifiuto si evolve in un materiale o in un oggetto, che può avere una qualità di un livello inferiore rispetto a quella della sua finalità iniziale, è detto "processo di *downcycling*".
Questo fenomeno nasce anche quando si utilizzano delle sostanze chimiche per trasformare lo scarto in qualcosa di nuovo. A causa di questo il valore del rifiuto si riduce, il suo ciclo vita diminuisce e si limitano possibili nuovi utilizzi.

[89] Department of the Environment, Transpot and the Regions. (1998). Opportunities for Change: Consultation Paper on a UK Strategy for Sustainable Construction. HMSO.
[90] Zhuo, C., & Levendis, Y. A. (2013). Upcycling waste plastics into carbon nanomaterials: A review. Journal of Applied Polymer Science, 131(4).

L'*upcycling* è il processo di lavorazione dei materiali con il quale si riesce ad ottenere un prodotto con una qualità finale maggiore.
Un grande vantaggio nasce quando non c'è bisogno di utilizzare ulteriori materie prime, nuove energie e potenzialmente far venire meno l'utilizzo di nuovi prodotti inquinanti.
Nonostante i benefici, questa tecnica non è sempre la scelta migliore per il possibile riutilizzo dei materiali, poiché produrre un oggetto di maggiore valore può richiedere molta energia e sforzo economico. [91]

Ligthart e Ansems [92] distinguono il processo di riciclo/riutilizzo in base a dove e come viene riutilizzato il materiale riciclato:

- **Riciclaggio/riutilizzo a circuito chiuso,** il materiale viene riutilizzato nello stesso modo
- **Riciclaggio/riutilizzo ad anello aperto**, le proprietà intrinseche del prodotto vengono modificate e il materiale non viene utilizzato nel suo utilizzo originale
- **Riciclaggio/riutilizzo a circuito semichiuso**: il materiale viene utilizzato in un altro prodotto senza modificare le proprietà intrinseche dei materiali.

[91] Recycling, upcycling, downcycling: quali sono le differenze? (2021, September 8). Veracura. https://veracura.network/recycling-upcycling-downcycling/
[92] Damanhuri, E. (2012). Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production. IntechOpen.

Smaltimento

Quando il riutilizzo e il riciclo non sono energeticamente ed economicamente vantaggiosi, si ricorre allo smaltimento e può essere effettuato per mezzo di inceneritori, termovalorizzatori o gassificatori. I primi sono impianti nei quali i rifiuti vengono inceneriti. Qui sono ammessi solo materiali che durante la combustione non possono sprigionare fumi e scorie tossiche per la salute umana.

Il termovalorizzatore, invece, è un impianto dedicato allo smaltimento dei soli rifiuti solidi che utilizza un processo di incenerimento che trasforma in energia elettrica il calore prodotto dalla combustione.

Infine, nei gassificatori i rifiuti vengono decomposti termochimicamente ottenendo un gas combustibile e scorie solide. Questo processo avviene attraverso l'inserimento di azoto e ossigeno ad elevate temperature, che permette la scissione dei legami chimici originari a favore della formazione di molecole più semplici. [93]

[93] Smaltimento rifiuti: termovalorizzatori, inceneritori, gassificatori e altri trattamenti termici dei rifiuti. (2019, June 3). Ingenio. https://www.ingenio-web.it/articoli/smaltimento-rifiuti-termovalorizzatori-inceneritori-gassificatori-e-altri-trattamenti-termici-dei-rifiuti/

Se non vi è alcun potenziale calorifico, i rifiuti devono essere conferiti in discarica. I rifiuti solidi che per loro natura non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica, ovvero non si dissolvono, non bruciano, degradano naturalmente e non sono soggetti a reazioni fisiche o chimiche, vanno assegnati alle discariche per inerti.
I Rifiuti Solidi Urbani (RSU) dovranno essere smaltiti in discariche per rifiuti non pericolosi. Infine, vi sono specifiche discariche per i rifiuti pericolosi per la salute umana e per l'ambiente. [94]

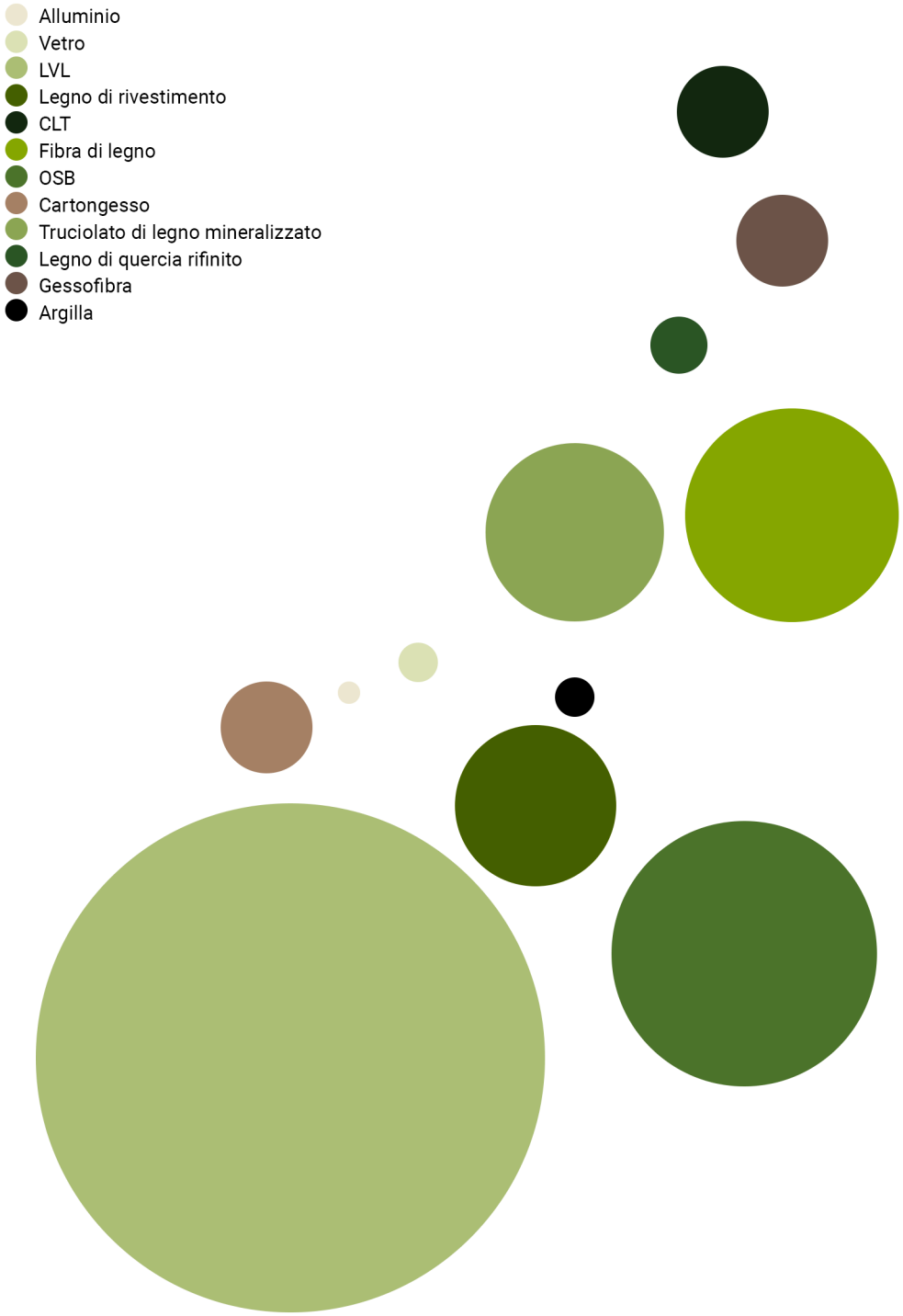
Nelle pagine seguenti sono stati riportati gli scenari potenziali di fine vita e recupero dei materiali presenti in quantità maggiori nel progetto *Circular Tower*.

L'immagine 163 riassume i materiali che costituiscono i componenti del caso studio in termini di massa (kg). Sono stati esclusi dal grafico le componenti impiantistiche (tra cui il sistema meccanico, idraulico ed elettrico comprendente l'impianto fotovoltaico), di arredo e le strutture di fondazione ipotizzate in cemento armato.

Figura 163: Le tipologie e le quantità dei materiali della Circular Tower

Fonte: produzione propria

[94] Cos'è e come funziona una discarica controllata. (2019, November 14). Green Cluster. http://greencluster.it/cose-e-come-funziona-una-discarica-controllata/


Alluminio
Vetro
LVL
Legno di rivestimento
CLT
Fibra di legno
OSB
Cartongesso
Truciolato di legno mineralizzato
Legno di quercia rifinito
Gessofibra
Argilla

Nella *Circular Tower* è stato scelto di utilizzare come materiale strutturale il legno ingegnerizzato.
Come già descritto precedentemente, è stata predisposta una struttura a telaio per il volume principale dell'edificio, e il *Laminate Veneer Lumber* (LVL) è risultato il materiale più adatto alla realizzazione di pilastri e travi nella composizione di campate aventi grandi luci. Invece, il volume scatolare che costituisce il vano scala è stato progettato in *Cross Laminated Timber* (CLT).
La presenza del legno non risiede unicamente nella struttura portante ma si ritrova in ogni componente stratigrafico. Nelle pagine seguenti verranno approfonditi gli scenari di fine vita dell'LVL, del CLT, dell'*Oriented Strand Board* (OSB) e dei panelli isolanti in fibra di legno.

3.3.1 Le tipologie di rifiuti del legno

Al temine della loro vita utile, gli elementi lignei sono classificabili in tre tipi di rifiuti:

- Rifiuti di legno non trattati,
- Rifiuti di legno ingegnerizzato
- Scarti di legno trattati con conservanti o verniciati.

I prodotti facenti parte della prima categoria (*Untreated Wood Waste*), solitamente utilizzati per l'intelaiatura degli edifici, non presentano

trattamenti effettuati con conservanti, provengono generalmente dal "legno tenero" derivante da alberi di conifere come pini e abeti o dal "legno duro" degli alberi a foglia larga come quercia e noce. [95]

La seconda categoria (*Engeneered Wood Waste*) comprende tutti i rifiuti generati dal fine vita dei prodotti in legno ingegnerizzato realizzati con scaglie di legno, trucioli, fibre pressate e incollate mediante l'utilizzo di resine e adesivi. I prodotti che fanno parte di questa categoria sono ad esempio l'*Oriented Strand Board* (OSB), il *Laminate Veneer Lumber* (LVL), il *Medium Density Fibreboard* (MDF) e il *Cross Laminated Timber* (CLT).

L'ultima categoria di rifiuti (*Painted Wood Waste*) include i prodotti verniciati. I conservanti più comunemente utilizzati per migliorare le qualità e la durabilità rispetto al degrado biologico sono: l'arseniato di rame cromato CCA, il quaternario di rame alcalino ACQ e i conservanti leggeri con solventi organici LOSP. [96]

[95] Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 333–359.

[96] Ximenes, F. A., Cowie, A. L., & Barlaz, M. A. (2018). The decay of engineered wood products and paper excavated from landfills in Australia. Waste Management, 74, 312–322.7

Le valutazioni del ciclo di vita dei rifiuti lignei individuano nel riciclaggio per la produzione di nuovi pannelli un'azione più virtuosa dal punto di vista ambientale rispetto alla combustione.
Le attuali operazioni di riciclaggio dei rifiuti di demolizione sono molto sensibili alla contaminazione. I prodotti privi di composti organici alogeni e altre sostanze nocive possono essere direttamente convertiti in trucioli di legno per la produzione di elementi compositi, mentre i rifiuti di legno pericolosi contenenti i policlorobifenili (PCB) devono essere trattati in modo speciale prima di essere reimmessi in processi di riciclaggio. [97]
Ulteriori processi di riciclaggio che avvengono nelle cartiere primarie possono portare alla produzione di nuovi prodotti come la pasta di legno, il pacciame paesaggistico, i pallet, il compostaggio e le lettiere per animali.

[97] Jahan, I., Zhang, G., Bhuiyan, M., & Navaratnam, S. (2022). Circular Economy of Construction and Demolition Wood Waste—A Theoretical Framework Approach. Sustainability, 14(17).

Nonostante quanto sopra citato, i processi di riciclaggio dei materiali sono poco frequenti a scala industriale a causa di misure politiche che inducono a favorire i processi di produzione di energia dalla biomassa. [98]

[98] Robert H. Falk, & David B. McKeever. (2004). Recovering wood for reuse and recycling : a United States perspective. European COST E31 Conference : Management of Recovered Wood Recycling Bioenergy and Other Options : Proceedings, 22-24 April 2004, Thessaloniki. Thessaloniki : University Studio Press, 2004: Pages 29-40.

3.3.2 Il legno strutturale

La mancanza di richiesta di materiali di recupero e di standard di progettazione e la presenza di norme edilizie che impediscono il riuso di componenti strutturali, sono i principali ostacoli che non permettono al legno strutturale, una volta terminato il suo ciclo vita, di essere riutilizzato come tale. Inoltre, vi è la necessità di progettare anticipatamente la demolizione (decostruzione) per evitare danni che influenzerebbero le potenzialità strutturali degli elementi. Un metodo di approccio utile potrebbe essere quello di individuare degli indicatori al fine di ottimizzare la decostruibilità e riutilizzabilità dei materiali. Ad esempio, possono essere individuati il tempo, la separabilità, la semplicità e l'intercambiabilità.

Uno studio [99] mostra come l'obiettivo di trasformare il ciclo vita dei componenti in edilizia da lineare a circolare può essere raggiunto sia per le fonti rinnovabili, a sinistra, che per i mate-

[99] MacArthur, E. (2020). The circular economy in detail. Foundation.
[100] Sirkin, T., & Ten Houtenb, M. (1994). The cascade chain: A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design. Resources, Conservation and Recycling, 10(3).
[101] Fraanje, P. J. (1997). Cascading of pine wood. Resources, Conservation and Recycling, 19(1), 21–28. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(96)01159-7
[102] Mantau U., Leek N., Saal U., Leek N., Oldenburger J., Asikainen A., Anttila P., Prins K., Lindner M., Verkerk H., & Eggers J. (2007). Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report.

riali finiti, rappresentati a destra dell'immagine 165. In questo modo vengono creati due "loop", dove il secondo, quello dei materiali, per ora non viene considerato importante tanto quanto il primo. Infatti, la tendenza è quella di definire i materiali come "biomassa" una volta terminato il primo ciclo di vita.

Un altro concetto discusso per raggiungere la sostenibilità delle risorse è "la catena a cascata" [100]. Questa teoria è stata successivamente applicata al legno da Fraanje nel 1998 [101], riassunta in figura 164.

Lo sviluppo di questo concetto di "cascata" e la sua applicazione possono contribuire a soddisfare la crescente domanda di legno. Secondo gli studi di Mantau e colleghi [102], infatti, lo sviluppo verso un'economia più rispettosa verso l'ambiente, porterà a un aumento sostanziale della richiesta di materiali legnosi con la possibilità di superare l'offerta attualmente disponibile da foreste certificate.

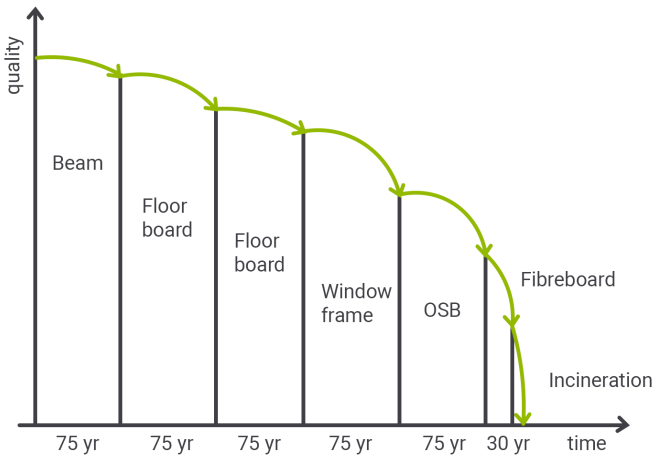
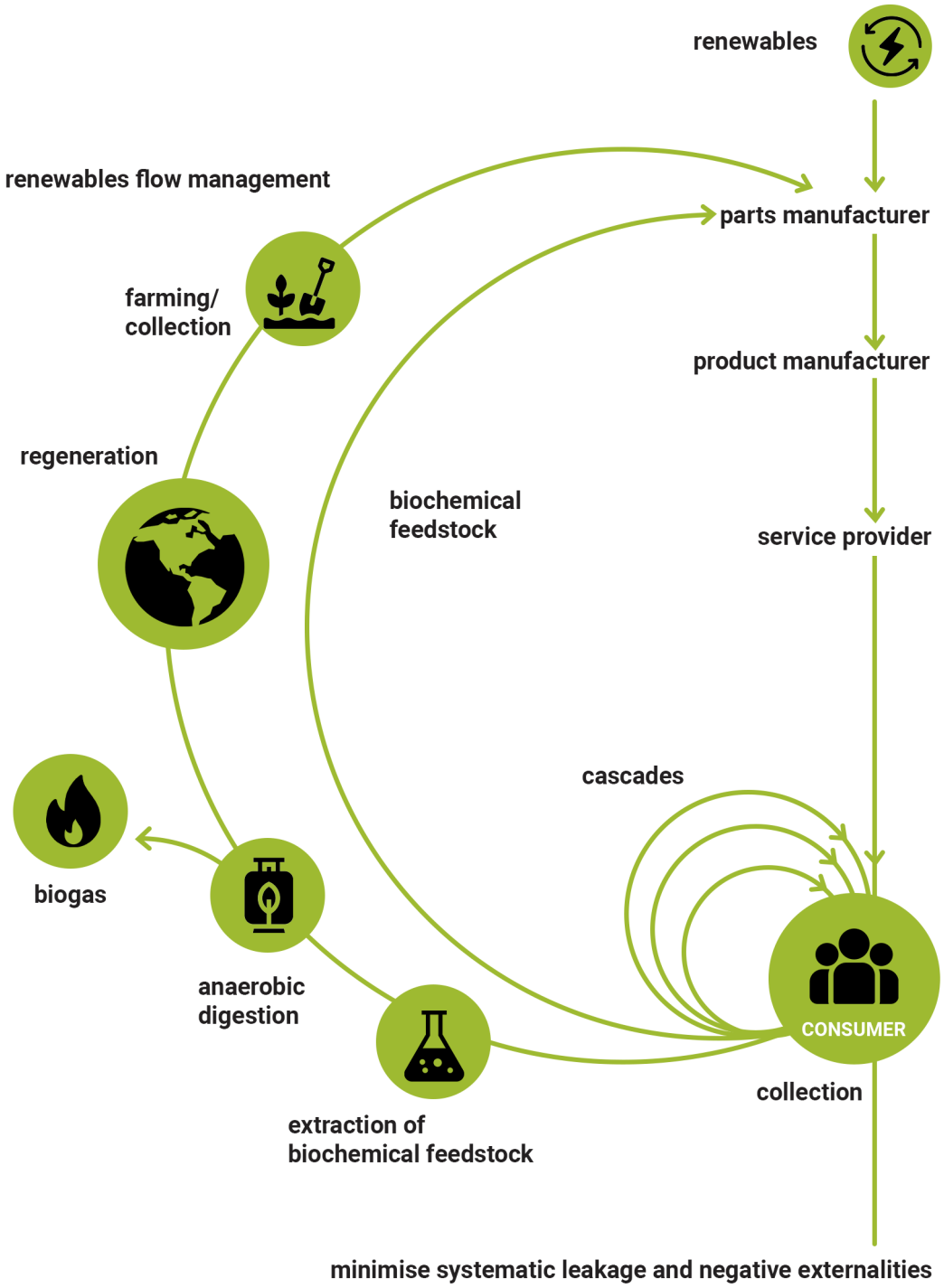


Figura 164: Potenziale a cascata del legno di pino.

Fonte: produzione propria basa su "Fraanje, P. J. (1997). Cascading of pine wood. Resources, Conservation and Recycling, 19(1), 21–28. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(96)01159-7 "


renewables
renewables flow management
parts manufacturer
farming/
collection
product manufacturer
regeneration
biochemical
feedstock
service provider
cascades
biogas
anaerobic
digestion
CONSUMER
collection
extraction of
biochemical feedstock
minimise systematic leakage and negative externalities

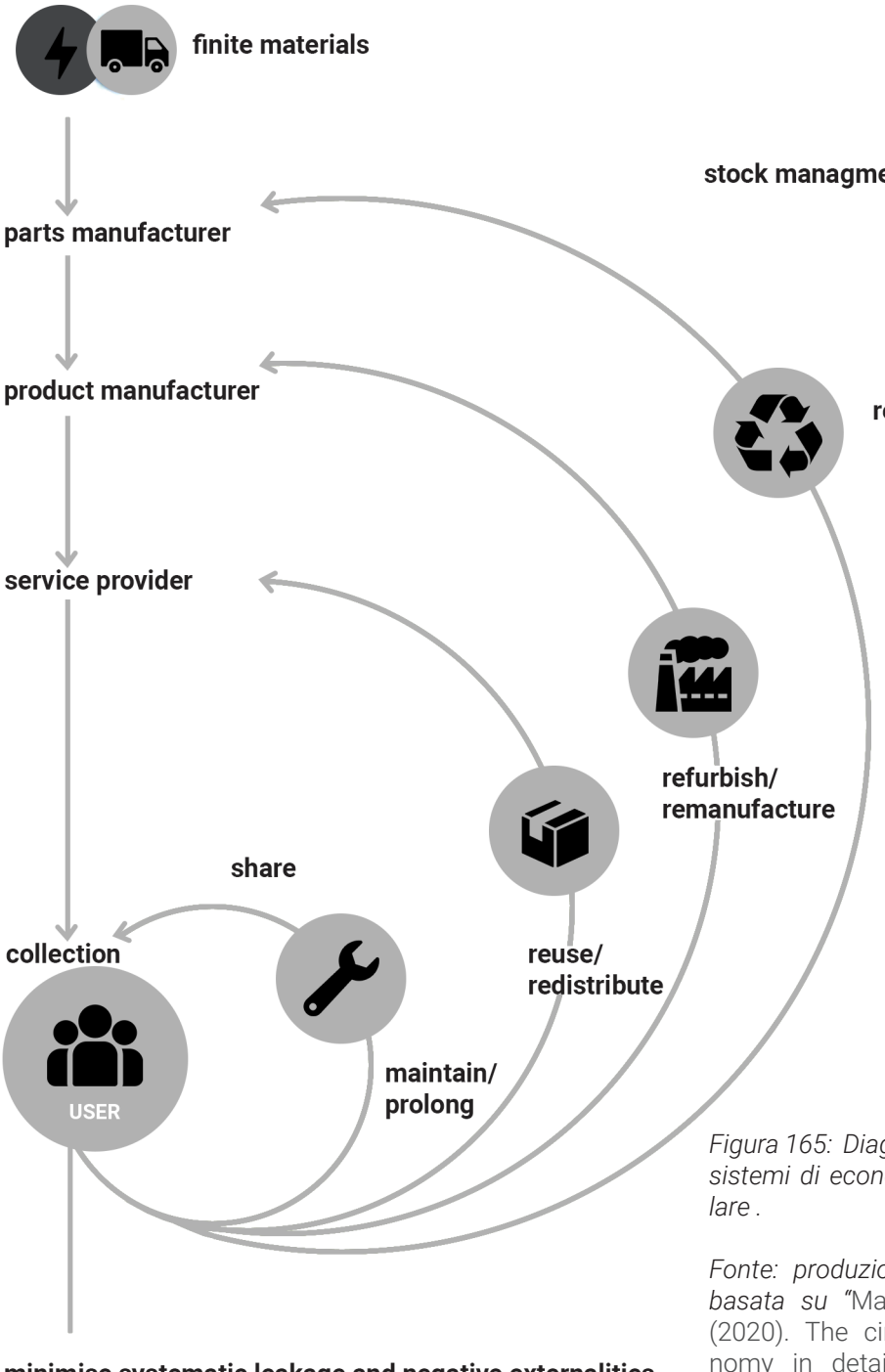


Figura 165: Diagramma dei sistemi di economia circolare .

*Fonte: produzione propria basata su "*MacArthur, E. (2020). The circular economy in detail. Foundation. *"*

La figura 166 mostra il ciclo attuale di carbonio e delle fibre lignee. La circolarità del legno è già assicurata dall'assorbimento e dal bilanciamento dell'anidride carbonica emessa durante l'incenerimento del legname da parte delle foreste. Questa percezione è stata un ostacolo per i Paesi europei di implementare la catena a cascata.
Nei Paesi dove vi è una presenza significativa di foreste certificate è trascurata l'idea e l'importanza di riutilizzare gli elementi di legno senza ridurlo a materia prima seconda per un prodotto oppure riciclarlo. Viene prestata più attenzione, invece, alla conversione in biomassa, anch'essa utile per un'Economia Circolare, che non si concentra su materiali recuperati, bensì sul legno vergine. Uno studio condotto da Lundmark [103] ha mostrato come in Svezia, nel 2045, se fosse priva di fossili, la richiesta di legno aumenterebbe notevolmente e la disponibilità non soddisferebbe le esigenze, considerando anche che le foreste dovrebbero mantenere una propria diversità biologica.

Recentemente, si è sviluppato il concetto di edificio come banca di materiali.

[103] Lundmark, T. (2020). The forest is not enough for all needs, how should we prioritize? (Skogen räcker inte - hur ska vi prioritera?). Future Forests Report. Swedish Agricultural University (SLU).
[104] Van den Berg, M. (2019). Managing Circular Building Projects. Dissertation. University of Twente.

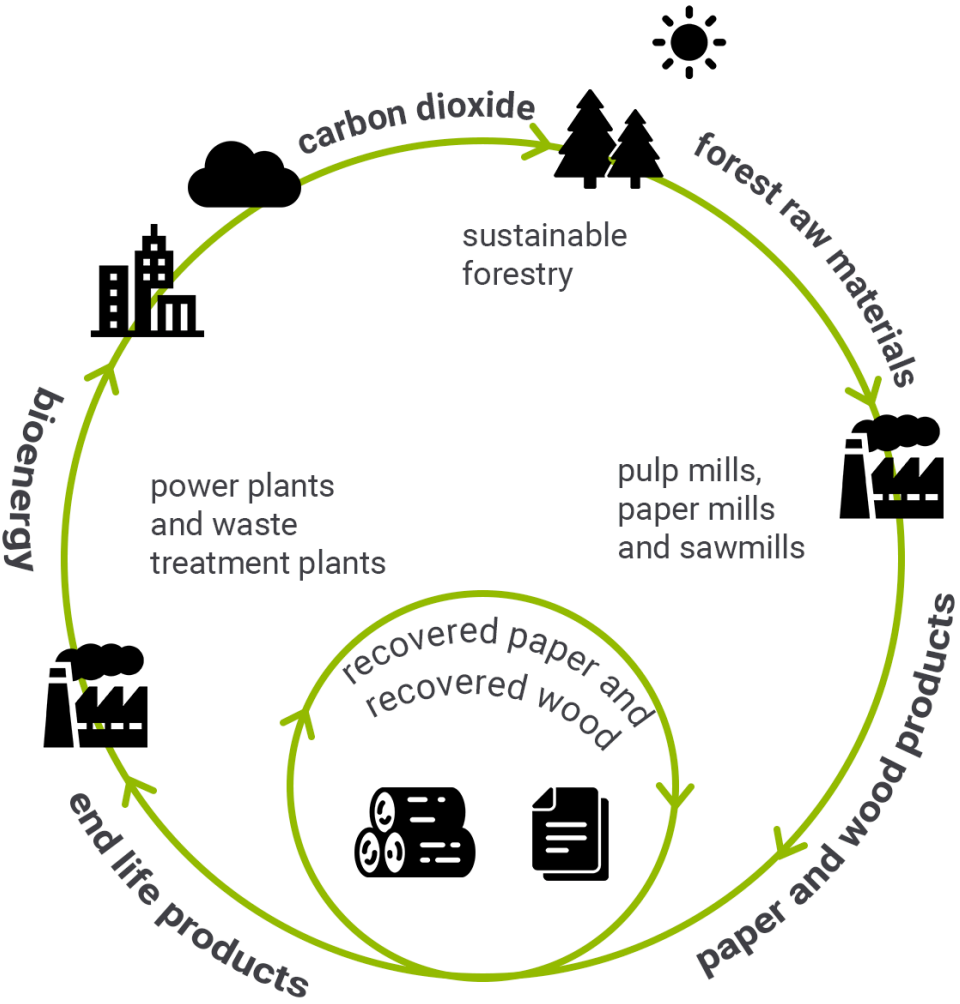


Figura 166: Illustrazione della circolarità del legno ed il suo ciclo del carbonio.

Fonte: Elaborazione propria basata su "Cristescu, C. et al.(2020). Design for deconstruction and reuse of timber structures – state of the art review. InFutureWood, 1(1). "

Essi possono essere inseriti, immagazzinati e raccolti per poi, una volta terminato il ciclo vita dell'edificio, essere riutilizzati e riciclati nella massima misura possibile [104]. Il concetto descritto è possibile attuarlo solamente se viene spostata l'attenzione su una modalità di progettazione che comprenda anche il seguito della demolizione.

Come descritto in precedenza, i componenti e gli edifici stessi dovrebbero essere progettati in modo tale che alla fine del ciclo vita la qualità del materiale sia intatta e si possa facilmente passare alla fase di riciclo. Tuttavia, si ottengono piccoli rendimenti da processi dispendiosi di riciclaggio, poiché il legno recuperato è di bassa qualità e poco eterogeneo. [105]
Alcuni studi [106][107] hanno dimostrato come l'utilizzo del legno di recupero sia tecnicamente possibile. Però, per aumentare la qualità dei prodotti e migliorare la pratica della cascata, sono necessarie nuove tecnologie di riciclaggio.
Oltre alla richiesta di queste ultime, il processo a cascata necessita di una demolizione strutturata in maniera differente e di una diversa gestione dei rifiuti.

Generalmente, i componenti di qualità superiore hanno un valore economico maggiore rispetto a elementi di qualità secondaria.

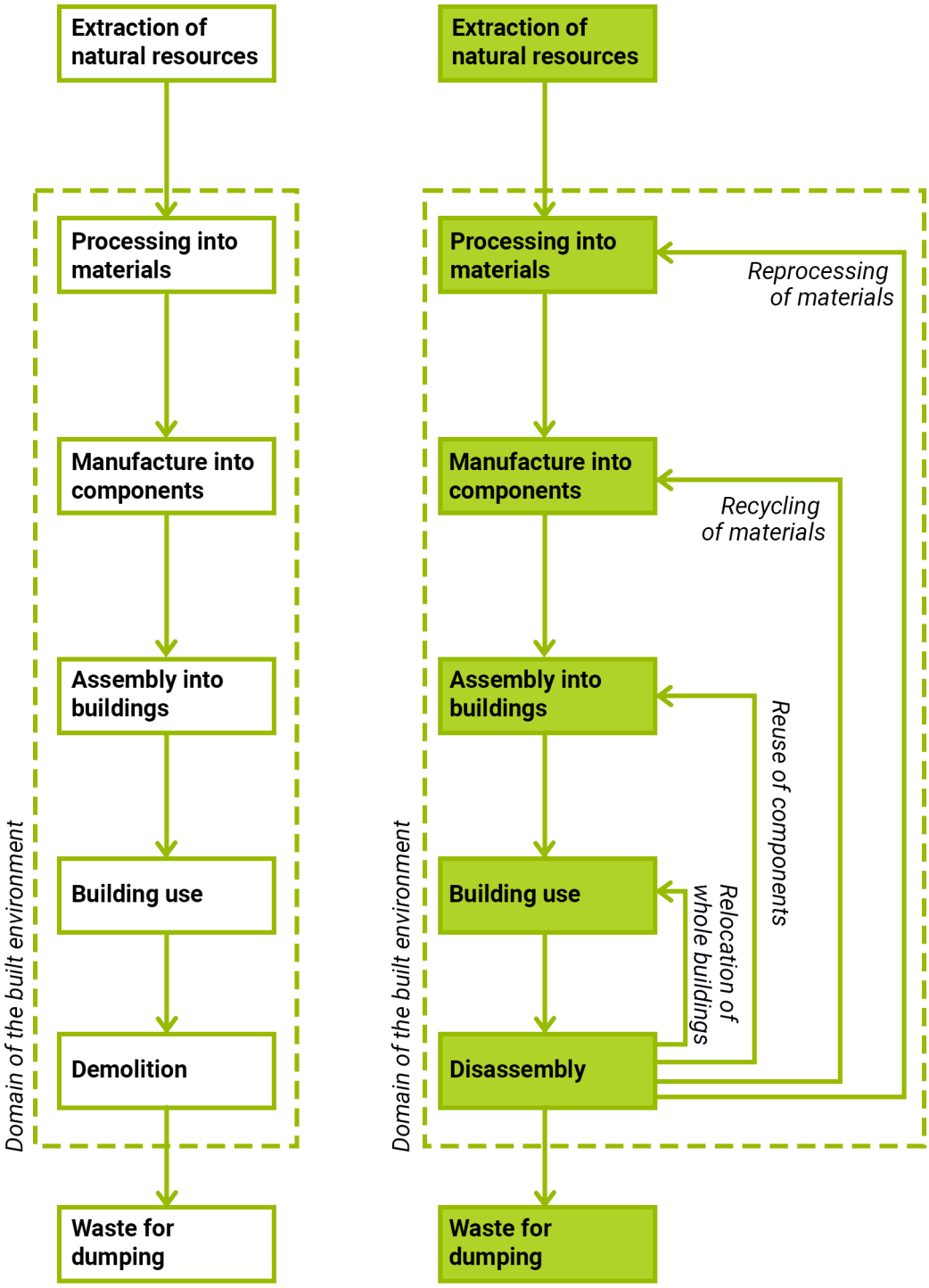
[105] Privat, F. [François P. (2019). Faisabilité du recyclage en boucle fermée des déchets post-consommateurs en bois massif. École Supérieure Du Bois.
[106] Irle, M., Privat, F., Deroubaix, G., & Belloncle, C. (2015). Intelligent recycling of solid wood. Pro Ligno 11.
[107] Lesar, B., Humar, M., Hora, G., Hachmeister, P., Schmiedl, D., Pindel, E., Siika-aho, M., & Liitiä, T. (2016). Utilization of recycled wood in biorefineries: preliminary results of steam explosion and ethanol/water organosolv pulping without a catalyst. European Journal of Wood and Wood Products, 74(5), 711–723. https://doi.org/10.1007/s00107-016-1064-8

Tuttavia, la separazione di elementi riutilizzati di qualità elevata è prediletta poiché trovare un'applicazione adeguata è difficile.
Vi sono diversi fattori che influenzano la difficoltà nel riutilizzo di componenti e materiali di un edificio. Ad esempio, l'elevato peso di alcune parti e la rivalutazione della qualità e della geometria degli stessi elementi dovuta alla mancanza di documentazione. La parte strutturale, oltre a essere pulita e non intaccata da altri materiali, deve essere ricalcolata. I progettisti possono richiedere l'adattamento delle componenti smontate per poi essere addirittura utilizzate per una funzione diversa da quella precedente. [108]

[108] Hradil, P. (2012). Barriers and opportunities of structural elements re-use. Research Raport. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo.

Figura 167: Modifica del ciclo di vita dell'ambiente costruito, da un modello lineare a un modello ciclico attraverso lo smantellamento degli edifici.

Fonte: Elaborazione propria basata su "Crowther, P. (2005). Design for Disassembly - Themes and principles. Environment Design Guide."


Extraction of natural resources
Processing into materials
Manufacture into components
Assembly into buildings
Building use
Demolition
Waste for dumping
Domain of the built environment
Extraction of natural resources
Processing into materials
Manufacture into components
Assembly into buildings
Building use
Disassembly
Waste for dumping
Domain of the built environment
Reprocessing of materials
Recycling of materials
Reuse of components
Relocation of whole buildings

Il legno lamellare

Il legno lamellare è un prodotto multistrato costituito da un numero variabile di strati di legno legati mediante l'utilizzo di adesivi. Il vantaggio di questo processo è la produzione di elementi curvi o diritti di dimensioni estese. Questo prodotto può essere composto da legnami teneri o duri, di diversa specie, che insieme alla tipologia di applicazione dell'elemento finale, ne determinano lo spessore.
Quando un prodotto in legno lamellare raggiunge la fine della sua vita utile, può essere riutilizzato, riciclato, messo in discarica o bruciato per produrre energia.

Il potenziale maggiore del legno lamellare, rimosso manualmente dall'edificio, si esprimerebbe mediante il riutilizzo diretto, cioè la ricollocazione senza ulteriori lavorazioni, generando una seconda vita simile alla prima.
Nell'ambito del riciclaggio, questo prodotto può subire un processo di *downcycling* attraverso la triturazione per la realizzazione di trucioli di legno i quali vengono reimmessi in ulteriori processi produttivi. Diversamente verranno portati nelle centrali a biomassa per la produzione di energia. [109]

Il *Cross Laminated Timber*

Il CLT (*Cross Laminated Timber*) è un elemento strutturale, che si presenta sotto forma di pannelli, costituiti da diversi strati incollati tra loro ad angolo retto in un numero dispari variabile da tre a nove.
L'orientamento trasversale delle singole lamelle e la struttura simmetrica del CLT permettono una stabilità dimensionale ed una capacità di carico estremamente elevate, sia longitudinalmente che trasversalmente alla direzione principale dello sforzo.

Giunto alla fine della vita utile, nell'ambito dello smantellamento selettivo, questo prodotto può essere riutilizzato in forma coerente sostituendo l'utilizzo di ulteriore materiale vergine.
Diversamente, negli scenari di riciclaggio, ne si consiglia la cippatura rispetto al recupero termico nelle centrali a biomassa in sostituzione all'uso dei gas naturali e dei combustibili fossili. [110] [111]

[109] Environmental Product Declaration for Laminated Veneer Lumber. (2013). American Wood Council.
[110] Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025 and EN 15804 for: CLT (Cross Laminated Timber). (2020). Stora Enso.
[111] Environmental Product Declaration, ISO 14025 and EN 15804 CLT. (2019). Binderholz Bausysteme GmbH.

La riclassificazione del legno strutturale

La possibilità di riutilizzo del legno strutturale è strettamente connessa all'analisi delle proprietà meccaniche del prodotto alla fine della sua vita utile. Il legno subisce fenomeni di invecchiamento naturali e può incorrere la presenza di danni meccanici locali dipendenti dalla durata di carico o attacchi biologici, quest'ultimi valutabili con diversi metodi [112]. Alcuni studi [113] dimostrano che la resistenza e la rigidità alla flessione sono influenzate solo marginalmente dall'invecchiamento permettendone quindi il riutilizzo. Vi è però da considerare l'effetto DOL (*Duration Of Load*) a cui è sottoposto il prodotto poiché l'intensità e la durata del carico applicato potrebbe influenzare la resistenza meccanica e comprometterne il riutilizzo. [114] [115]

Con l'approccio alla decostruzione di edifici è possibile riutilizzare i materiali, preservandone l'integrità e il valore nella massima misura pos-

[112] Philipp Dietsch, & Jochen Köhler. (2010). Assessment of Timber Structures (1st ed.). ShakerEditor.
[113] Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S. (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. Construction and Building Materials, 114, 681–687. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001
[114] Fink, G., & Kohler, J. (2011). A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures. Engineering Structures, 33(11), 2962–2968. http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.028

sibile.
La decostruzione enfatizza una gerarchia dell'uso materiale; prima riutilizzare, quindi riciclare.

I prodotti di legno ingegnerizzato sono classificati secondo standard europei in base alla resistenza meccanica ma non sono presenti linee guida in merito alla ri-classificazione dello stesso prodotto, una volta giunto al suo fine vita, quando intende essere riutilizzato.
La normativa EN 14081-1 [116] indica che il legname strutturale precedentemente classificato non deve essere riclassificato allo stesso grado o a gradi diversi a meno che non sia concessa una deroga speciale. Concludendo, per quanto il riutilizzo del legno strutturale, a seguito di una corretta procedura di analisi del suo stato, possa essere attuato non è ancora permesso dalle normative europee. Di conseguenza la totalità dei rifiuti di legno viene utilizzata per la produzione di truciolato o nei processi di combustione per la produzione di energia.

[115] Hansson, M., & Isaksson, T. (2006). Simulation of Load Carrying Capacity of Sheathed Parallel Timber Beam Structure. Journal of the Institute of Wood Science, 17(3).
[116] Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. (2012). In CEN (EN 14081).

Ostacoli al riutilizzo del legname da costruzione

Nonostante la presenza del Piano d'Azione per l'Economia Circolare [117], la mancanza di dati standardizzati sulla catena del valore, di modelli costruttivi lineari, di certificazioni e garanzia di qualità sui prodotti recuperati e la maggiore complessità nelle procedure di smontaggio rispetto alla demolizione determinano una ridotta applicazione del riutilizzo dei componenti strutturali di matrice legnosa.
Nel documento "Barriers and opportunities of structural elements re-use" [118], Hradil individua quattro categorie di ostacoli al riutilizzo delle strutture edilizie: economico, sociale, ambientale e tecnologico.
I limiti economici sono dettati dalla mancanza di domanda di legno di recupero nei paesi aventi ampio territorio forestale e una rete efficiente di impianti di combustione. [119]

[117] Circular economy action plan. (2020). Environment. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
[118] Hradil, P. (2014). Barriers and opportunities of structural elements re-use. Research Raport. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo
[119] Brismark, J. (2020). Riutilizzo e riutilizzabilità nel settore delle costruzioni - Uno studio sulle barriere e sulle opportunità di sviluppo con particolare attenzione al legno lamellare incrociato. Environmental and Energy Systems Studies.

La demolizione raramente considerata nelle fasi progettuali e costruttive in concomitanza alla diminuzione delle pratiche di decostruzione manuale negli ultimi 50 anni ha ridotto la possibilità di estrarre i componenti dal sistema edilizio mantenendo la qualità iniziale. Alcuni fattori che influenzano le pratiche di demolizione sono: le pressioni per ridurre i costi, l'incertezza del valore economico dei beni ricavati dalla decostruzione, la mancanza di documentazione che testimoni il processo di costruzione e i vincoli dettati dal sito. [120]

Inoltre, i regolamenti edilizi rappresentano un ostacolo poiché, prima del riutilizzo del legno, è necessario valutarne l'efficienza meccanica. Questa procedura attualmente non è standardizzata e non può seguire l'originale metodologia di classificazione a causa dei possibili danni dovuti dall'utilizzo. Quindi, è fondamentale istituire nuove procedure di ri-classificazione che rivedano alcune strutture legislative. Alcune di esse sono, ad esempio, le legislazioni che riguardano la salute e sicurezza, la gestione, di costruzione e il controllo di sostanze pericolose. [121]

[120] Cristescu, C., Honfi, D., Sandberg, K., Sandin, Y., Shotton, E., Walsh, S. J., Cramer, M., Ridley- Ellis, D., Risse, M., Ivanica, R., Harte, A., Uí Chúláin, C., De Arana-Fernández, M., Llana, D. F., Íñiguez-González, G., Barbero, M. G., Nasiri, B., Hughes, M., & Krofl, Ž. (2020). Design for deconstruction and reuse of timber structures – state of the art review. InFutureWood, 1(1).

Di particolare importanza nell'accettazione del legno recuperato sul mercato è la garanzia sull'assenza di pericolosità per la salute ambientale. Essendo un materiale da costruzione biologico incline al degrado biotico, il legno necessita di cure e controlli speciali per evitare la contaminazione da muffe, funghi o insetti.
Alcune aziende hanno trovato una soluzione nell'utilizzo di camere di riscaldo trattando termicamente il legno di recupero di grandi dimensioni, al fine di rimuovere le muffe e l'umidità.

Il riutilizzo del legno strutturale è definita dallo studio eseguito da Debacker [122] come l'opzione migliore per massimizzare il potenziale di recupero dell'edificio.
Gli strumenti BIM risultano essere un ottimo mezzo per incentivare la gestione efficace delle risorse, attraverso l'uso di strumenti digitali come i registri degli edifici, capaci di incrementare la documentazione sull'uso e sulle prestazioni dei componenti edili. Inoltre, i "passaporti

[121] Circular economy action plan. (2020). Environment. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
[122] Debacker, W., & Manshoven, S. (2016). Synthesis of the state-of-the-art: Key barriers and opportunities for materials passports and reversible building design in the current system. BAMB. https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/03/D1_Synthesis-report-on-State-of-the-art_20161129_FINAL.pdf

dei materiali“ [123] potrebbero incrementare l’accettazione sociale dei materiali riciclati e dei componenti riutilizzati. Infine, gli edifici progettati con caratteristiche DfDR potrebbero possedere un valore di mercato maggiore. [124]

[123] Debacker, W., & Manshoven, S. (2016). Synthesis of the state-of-the-art: Key barriers and opportunities for materials passports and reversible building design in the current system. BAMB. https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/03/D1_Synthesis-report-on-State-of-the-art_20161129_FINAL.pdf
[124] Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015b). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Procedia Engineering, 118, 1296–1304. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485

Applicazione del riutilizzo del legno strutturale: La Modular House MAI

La Casa Modulare MAI-Ivalsa [125] è un progetto di ricerca realizzato dal Cnr-Ivalsa Trees e Timber Institute con il supporto della Provincia Autonoma di Trento al fine di dimostrare che è possibile e vantaggioso impiegare X-lam di riutilizzo per le strutture portanti di moderni edifici prefabbricati, trasportabili e sostenibili.
Il prototipo è stato ideato e progettato da Andrea Briani e Paolo Simeone CNR-Ivalsa Architectural Design Team con la supervisione del Prof. Ario Ceccotti e realizzato da 13 imprese artigiane trentine legate al settore immobiliare.
Questo prototipo di abitazione è stato realizzato mediante il reimpiego dei pannelli X-lam utilizzati per i test giapponesi del progetto SOFIE [126], i quali sono stati successivamente spediti, nel 2008, a Ivalsa e collocati per due anni nei laboratori esterni dotandoli di un semplice riparo. In tal modo l'erosione naturale è stata limitata ma non esclusa.
Nel 2010, in seguito alle analisi e alla definizione di metodi di misurazione del contenuto di umidità è emerso che le discromie e le mac-

[125] Briani, A., Simeone, P., & Ceccotti, A. (2012). MAI, Ivalsa modular hose - Timber Design Society. yumpu.com. https://www.yumpu.com/en/document/read/12383373/00402-ario-ceccotti-timber-design-society
[126] Progetto SOFIE. (2011). Consiglio Nazionale Delle Ricerche.

chie di sapinosità presenti non abbiano ridotto le proprietà meccaniche. Perciò è stato possibile il riutilizzo degli elementi lignei per un uso strutturale in seguito al ridimensionamento e alla rifilatura per eliminarne le parti deteriorate. Per rendere possibile il reimpiego strutturale, il contenuto di umidità deve risultare inferiore al 20% e non vi devono essere riscontrate rotture importanti. I tagli sono stati realizzati mediante seghe circolari manuali.

Figura 168: Le strutture portanti MAI realizzate con i pannelli X-lam di recupero dell'edificio SOFIE di 7 piani.

Fonte: Briani, A., Simeone, P., & Ceccotti, A. (2012). MAI, Ivalsa modular hose - Timber Design Society. yumpu.com.

3.3.3 L'*Oriented Strand Board*

L'*Oriented Strand Board* (OSB) è un pannello di legno strutturale versatile utilizzato nel progetto *Circular Tower* con le funzioni di controventatura e finitura di alcuni componenti.
È costituito da trefoli di legno ricostituiti e orientati meccanicamente, legati grazie a processi termici e di pressione utilizzando degli adesivi a base di resina fenolica impermeabile.

Il nome di questo materiale deriva dalla posizione e dall'orientamento delle scaglie di legno. Quelle collocate sulla superficie sono orientate lungo l'asse del pannello, mentre quelle interne sono casuali. Ciò si traduce in un pannello in legno ingegnerizzato strutturale con proprietà di rigidità, resistenza e stabilità dimensionale migliorate.

L'OSB è generalmente composto da [127]:
- Trucioli di legno, 90-93 %
- Resina, 2-4 %
- Cera, 1 %
- Acqua, 3-5 %

L'OSB, a causa della sua composizione, risulta essere un materiale poco adatto alle finiture, di conseguenza è realizzato utilizzando efficientemente risorse forestali meno pregiate come il pioppo tremulo, il pioppo e il pino giallo me-

ridionale. Un ulteriore vantaggio connesso alle scaglie di legno nella produzione dei pannelli in OSB è che queste possono essere ricavate a partire da alberi difettuali. [128]
Nonostante l'OSB contenga una quantità inferiore di formaldeide rispetto a materiali simili come MDF e truciolati, vi è meno probabilità di riutilizzo poiché è un materiale vulnerabile al rigonfiamento e alla delaminazione dovuti all'umidità o all'esposizione a temperature elevate. [129]

Al termine della vita utile del prodotto, i pannelli in OSB vengono smontati con la stessa operazione effettuata per la posa, mediante avvitatori elettrici. Una volta decostruito può essere in parte utilizzato per la generazione di trucioli di legno o destinato agli impianti di termovalorizzazione a biomassa per il recupero energetico e per la generazione di calore ed elettricità, sostituendo i comuni combustibili fossili. [130] [131]

[127] Thinkstep Sphera Company. (2018). EPD for Oriented Strand Board. Norbord.
[128] Sustainability and OSB - Woodguide.org. (2014, November 9). The Upstyle Wood Guide. https://www.woodguide.org/guide/osb/
[129] Kronospan. (2018). Environmental Product Declaration According to EN 15804 and ISO 14025. Kronospan OSB, Spol. S r.o.
[130] Reusewood.org. (2020). https://reusewood.org/guide/oriented-strand-board
[131] Disposal of OSB. (2016, December 22). West Fraser - Integrated Forestry Company. https://osb.westfraser.com/blog/disposal-of-osb/

3.3.4 I pannelli isolanti in fibra di legno

Nel progetto *Circular Tower* sono stati utilizzati pannelli isolanti rigidi in fibra di legno, di diversi spessori e densità al fine di garantire un adeguato livello di isolamento termico.
Questi elementi possono essere prodotti con processi a umido o a secco. Sono classificabili come rifiuti speciali non pericolosi e se non vi è la possibilità di separarli da altri rifiuti, per effettuarne un corretto riciclaggio, è richiesto uno smaltimento in discarica per rifiuti speciali. [132]

Questo tipo di isolanti è costituito da fibre di legno pressate e incollate mediante l'utilizzo di una ridotta quantità di legante al fine di conferire coesione strutturale.
Generalmente le proporzioni sono [133]:

- Legno di conifere, 83 %
- Carta riciclata, 7 %
- Acqua, 6 %
- Ritardanti di fiamma, 2 %
- Fibre bi-componenti, 1 %
- Adesivi, 1 %

La miscela di fibre non trattate può essere ottenuta da trucioli di legno derivanti da foreste commerciali certificate da etichette di sostenibilità (FSC e PEFC) oppure da trucioli di legno postindustriali e riciclati. Può quindi contenere

una percentuale variabile di materiale riciclato.
Le etichette di sostenibilità garantiscono la provenienza della materia prima da foreste controllate, nelle quali la quantità di legno prelevato non eccede rispetto alla quantità in crescita.

Alla fine della vita utile del prodotto, in seguito al processo di decostruzione, i pannelli vengono usualmente pressati ed ordinati, ed in seguito conferiti in discarica o riciclati termicamente negli inceneritori o nelle centrali a biomassa.
I pannelli possono quindi essere usati come fonti di energia rinnovabile con un elevato potere calorifico per generare energia elettrica sostituendo l'impiego di combustibili di origine fossile. [134]

Nella misura in cui i materiali isolanti in fibra di legno non siano contaminati, la materia prima può essere facilmente riammessa al processo di produzione iniziale.

Un ulteriore metodo di riciclaggio riguarda la produzione di elementi truciolati che rappresenteranno la materia prima in altri processi produttivi.
Quando invece i pannelli sono disinstallati senza danneggiamenti, possono essere riutilizzati nel medesimo spettro di applicazioni.

After use of insulating materials	Reuse	Composting	Recycling	Incineration	Landfiling
Fiberboard	x	-	x	x	o
Blow-in cellulose	-	-	-	x	o
Straw	(x)	x	-	x	o
Hemp	x	x	-	x	o
Flax	x	x	-	x	o
Seagrass	-	x	-	x	o
Cork	-	x	(x)	x	o
EPS	-	-	x	x!	o
XPS	-	-	x	x	o
PURE	-	-	x	x	o
Glass wool	-	-	-	-	x
Rock wool	-	-	(x)	-	x
Foam glass	-	-	(x)	-	x
Perlites	-	-	-	-	x
Calcium silicate	-	-	(x)	-	x
ETICS	-	-	-	x	x?

X = usual way of recycling (with sorted separation!)
(x) = theoretically possible recovery route
o = possibld, but not a priority recycling method

Figura 169: Confronto tra i potenziali scenari di fine vita di alcune tipologie di isolante.

Fonte: Holz Von Hier. (2018). Wood fiber insulation. Interreg Alpine Space CaSco.

[132] Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2020, November 20). Dichiarazione Ambientale di Prodotto per ISO 14025 e EN 15804. www.betonwood.com.
[133] Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2016, May 2). Dichiarazione Ambientale di Prodotto per ISO 14025 e EN 15804. www.betonwood.com.
[134] Holz Von Hier. (2018). Wood fiber insulation. Interreg Alpine Space CaSco.

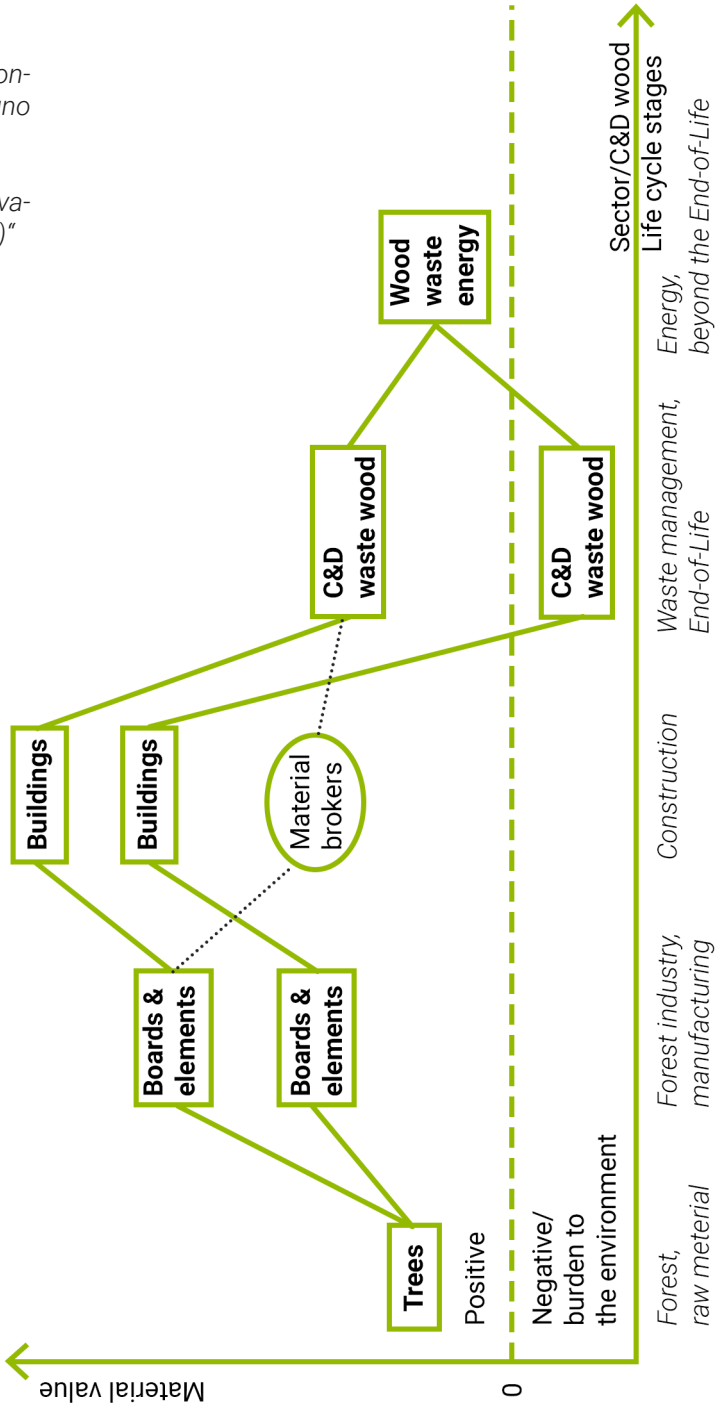


Figura 170: Quadro concettuale del ciclo del legno nell'edilizia.

Fonte: "Risorse, conservazione e riciclaggio (2021)"

3.3.5 Le membrane impermeabilizzanti

Al fine di impermeabilizzare l'involucro del progetto *Circular Tower* è stato ipotizzato l'utilizzo di una membrana generica avente caratteristiche medie. Questo prodotto è classificabile come rifiuto speciali non pericoloso. Può subire, al termine della sua vita utile, processi di riciclaggio al fine di convertire il rifiuto in materia prima seconda MPS, evitando la dismissione in discarica per rifiuti speciali non pericolosi. Quest'ultima è da effettuare unicamente se il prodotto non è divisibile dagli altri rifiuti.

Le membrane sono generalmente composte da più strati: quello antiadesivo (sabbietta, talco o film poliolefinico), il *compound* bituminoso fillerizzato (miscela di bitume e polimeri), e infine quello antiaderente (film o tessuto non tessuto poliolefinico, sabbietta).
In base al tipo di applicazione può variare la percentuale di polimero che compone la membrana, ottenendo resistenze termiche alle basse e alte temperature variabili. [135]

[135] Giavarini, C. (2021). Il riciclaggio nel conglomerato bituminoso delle membrane bitume-polimero: Recycling in the asphalt mix of membranes made of bitumen and polymers. SITEB.

Lo scenario riciclaggio più adatto per le membrane è l'impiego per la produzione di conglomerato bituminoso, recuperando in parte il valore del rifiuto. [136]
L'80% di questi prodotti è composto da un legante pregiato. Il bitume, il *filler*, i polimeri e le fibre dell'armatura organica presenti nelle membrane sono elementi fondamentali per la produzione di conglomerato bituminoso perciò l'ipotesi di riciclarli risulta la più efficiente.
Esistono altri potenziali impieghi meno virtuosi alla fine del loro ciclo di vita tra cui l'utilizzo nelle centrali alimentate a carbone o nei forni dei cementifici.

Le problematiche annesse al riciclaggio delle membrane riguardano in primo luogo il distacco di esse da altri materiali inerti presenti nell'involucro edilizio che andranno opportunamente separati. Inoltre il tessuto polimerico necessita di un pre trattamento meccanico oneroso in termini energetici che consiste in una macinazione.

In seguito al trasporto nel sito di riciclaggio viene accertata la qualità del materiale per stabilirne approssimativamente la composizione.

[136] Giavarini, C., & Santarelli, L. (1994). Membrane bituminose contenenti nuovi polimeri olefinici. Rassegna Del Bitume, 28, 13.

Viene eseguita una prima macinazione e una selezione per la quale vengono scartate parti di membrane non idonee al proseguimento del processo di riciclaggio. Infine viene eseguito un processo di triturazione, ottenendo un prodotto a granulometria fine utile alla creazione del conglomerato.

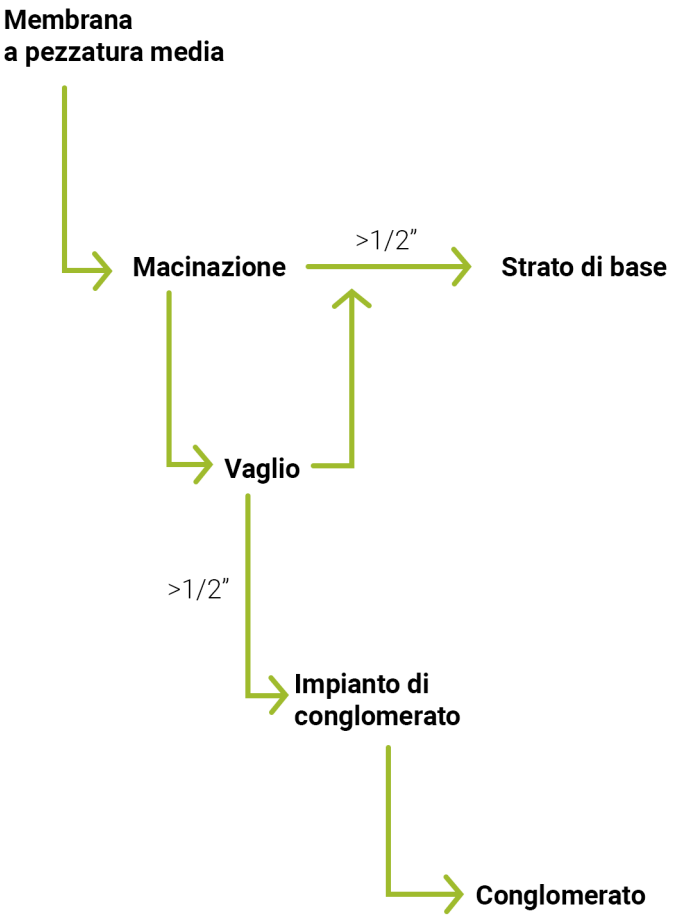


Figura 171: Schema semplificato dell'impianto di riciclaggio delle membrane.

*Fonte: produzione propria basata su "*Krivit, D. (2007). Recycling tear-off asphalt shingles: best practice guide. CMRA."

3.3.6 Il cartongesso

La scelta dei pannelli in cartongesso nel progetto *Circular Tower* è applicata alle finiture interne delle pareti al fine di creare un intercapedine per la posa degli impianti e che ne facilitasse la manutenzione.
I fogli di cartongesso sono fondamentalmente composti da intonaco di gesso inserito tra due strati di carta. [137]

Quando le lastre in cartongesso esauriscono la funzione per la quale sono state applicate, si prevede che esse vengano smontate dall'edificio attraverso procedure similari a quelle di messa in opera. I grandi pezzi di cartongesso in buone condizioni possono essere, grazie all'uso di borchie metalliche e sistemi di tracciamento, decostruiti e riutilizzati nell'edilizia. [138]

La carta di rivestimento e lo strato centrale del pannello sono riciclati separatamente per produrre nuovi fogli riciclati. [139]

[137] Environmental Product Declaration in accordance whit ISO 14025 and EN 15804, Plasterboard. (2022). Knauf.
[138] Gypsum Recycling in the National Capital Region. Available online: http://www.cricouncil.com/wp- content/uploads/2011/03/CRI-Final-Report-July-6-10.pdf (accessed on 1 October 2016).
[139] Plasterboard. (n.d.). Planet Ark Business Recycling. https://businessrecycling.com.au/recycle/plasterboard

La polvere di gesso ritrattata, che costituisce fino al 94% del cartongesso, può essere rispedita ai produttori per la produzione di nuovi pannelli. [140]
Questa procedura può avvenire quando vi sono bassi livelli di contaminazione, generalmente dovuti da chiodi, viti e rivestimenti murali. I rifiuti di gesso vengono macinati elettromeccanicamente per ridurre la granulometria.
Diversamente, può essere riciclata ottenendo una nuova gamma di prodotti in gesso tra cui la ceramica, le superfici stradali, il gesso di Parigi (applicazioni mediche) e l'uso in ammendanti per l'industria agricola ideali per aiutare a migliorare la struttura nei terreni argillosi pesanti.
Anche la carta, che costituisce fino al 6% del cartongesso, può essere riutilizzata in vari settori a seguito di un processo di decantazione. [141]
Il riciclo di questa tipologia di rifiuti è attualmente limitato all'incorporazione di piccole frazioni dell'intonaco di gesso che integra queste lastre nella produzione di lastre nuove.
La Commissione Europea ha creato nel 2013 il progetto *Gypsum to Gypsum* (GTOG) per promuovere l'economia circolare tra i produttori di cartongesso.

[140] Plasterboard removal. (2010). Department of Environment, Climate Change and Water NSW.
[141] Environmental Product Declaration in accordance whit ISO 14025 and EN 15804 Gyproc Wallboard. (2016). Gyproc.

A seguito del progetto GTOG, il 30% dei residui di gesso è stato reincorporato nel processo produttivo di lastre di cartongesso nuove, senza significative perdite di caratteristiche meccaniche. Inoltre, i rifiuti sono stati trattati e utilizzati senza alcun tipo di contaminante, come la carta di rivestimento, che doveva essere smaltita in discarica [142] [143].
Le valutazioni di impatto ambientale mostrano che l'utilizzo del gesso riciclato porta vantaggi rispetto al gesso delle centrali a carbone (FGD) e anche al gesso naturale; tuttavia, si è concluso che la distanza specifica del trasporto ha un grande effetto sui risultati [144].

Possono insorgere problematiche quando i residui di gesso non vengono adeguatamente gestiti poiché essi contaminano gli altri rifiuti inerti dell'edilizia, ne riducono il potenziale di riciclaggio e generano gas acido solfidrico (H2S), mortale in larga parte [145].

[142] Yost, P., & Lund, E. (1997). Residential Construction Waste Management: Builders Field Guide. National Association of Homebuilders Research Center: Upper Marlboro.
[143] Ndukwe, I., & Yuan, Q. (2016). Drywall (Gyproc Plasterboard) Recycling and Reuse as a Compost-Bulking Agent in Canada and North America: A Review. Recycling, 1(3), 311–320.
[144] Coal Combustion Residual Beneficial Use Evaluation: Fly Ash Concrete and FGD Gypsum Wallboard. (2014). United States Environmental Protection Agency.
[145] Drywall Recycling: C&D Recycling Program.

3.3.7 Il fibrogesso

Il fibrogesso è un materiale derivato da gesso e fibra di cellulosa, è prodotto in lastre e compone il massetto a secco dei solai nel caso studio della *Circular Tower*. Possiede un aspetto similare al cartongesso, ma la differenza sostanziale è nella massa, dove la fibra di cellulosa incrementa la resistenza e la stabilità rendendo il materiale un ottimo isolante acustico.

Questo materiale può essere ottenuto mediante l'utilizzo di risorse riciclate pre-consumo e post-consumo. La normativa ISO 14021 definisce il pre-consumo come la quantità di prodotto derivante dal flusso di rifiuti di un processo industriale esterno. Il post-consumo è invece identificato come la quantità di prodotto riciclato in seguito all'utilizzo dei consumatori finali.

Le lastre di fibrogesso possono quindi includere una percentuale variabile dal 30 al 70% di gesso da desolforazione di gas combustibili come prodotto pre-consumo e per circa il 20% di fibre di carta da macero come riciclato post-consumo. [146]

[146] Materiali per il costruire sostenibile. (2018). Fermacell.

3.4 Considerazioni conclusive

Constatato l'esaurimento delle risorse del pianeta, le problematiche in merito allo smaltimento dei rifiuti e il crescente livello di inquinamento ambientale, è stato compreso come sia necessario un cambiamento del modello economico, da lineare a circolare. Il processo "closing the loop" permette di aumentare l'efficienza dell'uso delle risorse, favorendo l'aumento dei benefici economici sull'uso dei materiali e la mitigazione degli impatti ambientali.
La transizione verso un'Economia Circolare richiede un cambiamento culturale e strutturale, che riguardi tutte le parti interessate nella catena del valore e implica la capacità di innovare non solo cicli produttivi e modelli di consumo, ma anche approcci culturali e stili di vita, considerando l'intero ciclo di vita del prodotto già in fase di progettazione. L'EC è resa operativa attraverso processi di conservazione del valore (VRP) noti anche come imperativi R: ridurre, riutilizzare, riparare, rifabbricare e riciclare.
Nell'ambito delle costruzioni, il manufatto deve avere la capacità di essere adattabile e dinamico mediante una struttura capace di mutare con il tempo. L'intero ciclo vita del sistema edilizio deve essere concepito in base alla capacità di trasformazione della struttura.
Per far sì che questo principio si realizzi, i mate-

riali da costruzione devono essere trattati come beni preziosi a lungo termine, scelti in base a un'idea di ripianificazione e rigenerazione. I materiali da costruzione che concludono la loro vita come rifiuti sono un grande errore di progettazione.

Si è compreso come le pratiche tradizionali di progettazione limitino le potenzialità di decostruzione. Per prolungare la vita utile dei materiali, al termine della EoL dell'edificio, è necessario applicare i principi del DfD già nella fase di pre-design. L'incremento dei componenti prefabbricati, realizzati con prodotti di dimensioni standardizzate a pannello, limita le lavorazioni in cantiere aumentando la sicurezza nella fase di costruzione. L'assemblaggio a secco senza uso di colle permette una decostruzione veloce ed efficace, riducendo la produzione di rifiuti.

I limiti riscontrati nell'applicazione di questa pratica riguardano la sfiducia dell'utente finale verso i materiali riusati, la convinzione che i costi di smontaggio superino quelli di demolizione e smaltimento e la concezione da parte dei progettisti del bene immobile come manufatto permanente.

"Closing the loop: An UE action Plan for the Circular Economy" è il percorso accolto dalla Commissione Europea e concretizzato attraverso la stesura delle quattro direttive del "pacchetto economia circolare", pubblicate il 14 giugno 2018 mirando alla transizione da una società

definibile “produzione-consumo-scarto” a una completamente circolare entro il 2050.
Nonostante siano attive diverse iniziative nell’ambito della circolarità, sussistono ancora significative limitazioni nel reimpiego del legno strutturale, seppur alcuni casi sperimentali ne dimostrano la fattibilità e il vantaggio economico e ambientale. Il riutilizzo del legno strutturale è tecnicamente possibile, posticipando il suo impiego come massa termica.

Conclusioni

Il presente elaborato, sviluppato a partire dal concorso di idee "Circular Tower" indetto dall'associazione Netzwerk TecLab, avente sede a Burgdorf (Canton di Berna, Svizzera), esprime la volontà di confrontarsi, giunti al termine del percorso di Laurea Magistrale, in un contesto internazionale.
Gli obiettivi del concorso vertono sui temi della sostenibilità edilizia, sull'utilizzo di materiali rinnovabili e climaticamente neutri, sulla scelta di componenti riciclati e sulla riutilizzabilità dei nuovi prodotti impiegati.

La Circular Tower, sita a 25 km da Berna, è stata progettata secondo i principi dell'architettura bioclimatica, utilizzando l'apporto delle fonti energetiche ambientali, nel pieno rispetto del clima locale, minimizzando l'uso di impianti meccanici, massimizzando l'efficienza degli scambi termici tra edificio e ambiente e infine garantendo il mantenimento delle condizioni di benessere e di funzionamento interno.
L'edificio di progetto sorge in un'area di incontro tra il costruito residenziale e quello industriale. Si affaccia sulla pista ciclabile isolandolo dal traffico veicolare e beneficia di un parcheggio per automobili limitrofo all'accesso carrabile.
L'ottima illuminazione del lotto è garantita

dall'assenza di ostacoli rilevanti a Sud. Gli alberi ad alto fusto si dispongono perimetralmente all'area di progetto in posizione Nord-Ovest, Nord e Nord-Est.

L'aspetto volumetrico dell'edificio è determinato della forma planimetrica irregolare del sito, definita da due blocchi intersecati tra loro: il principale, più esposto e visibile, collocato a Sud-Est e il vano di servizio, di dimensioni ridotte, posto a Nord-Ovest.

Dato il vincolo progettuale in altezza, la Circular Tower raggiunge i 30 metri ammessi, per un totale di sette piani con altezze interpiano nette di 3,5 metri. Al piano terra è collocata la hall e i tre piani successivi ospitano i laboratori di ricerca. Seguono una sala mostre e due piani adibiti agli eventi. Al culmine della torre è presente una terrazza panoramica accessibile al pubblico.
Le destinazioni d'uso sono strettamente correlate allo studio delle utenze, identificate in quattro tipologie: ricercatori, turisti, ospiti e scolaresche.

La struttura portante è stata realizzata in legno. Questo materiale è stato scelto poiché nella fase di produzione esso richiede una ridotta quantità di energia e per le sue caratteristiche intrinseche di immagazzinare CO_2.
Il corpo scala è progettato con una struttura

portante in CLT, mentre il volume principale è caratterizzato da un sistema a telaio composto da travi in LVL di 36x52 cm che ha permesso di coprire una luce di 9 metri, creando spazi senza alcun ingombro.
La struttura a telaio ha permesso la progettazione di un esteso involucro trasparente, rappresentato dalle serre bioclimatiche che hanno la funzione di ridurre i consumi energetici necessari al raggiungimento del comfort termico. Inoltre, queste ultime hanno permesso l'incremento dello spazio interno, creando zone filtro che si affacciano sui punti panoramici che il sito di progetto offre. La scelta di sostituire il semplice involucro trasparente tradizionale con un sistema di serre è stata basata sugli studi climatici. La superficie vetrata delle serre ospita i sistemi attivi della produzione di energia elettrica grazie ai pannelli fotovoltaici trasparenti a bassa densità.

La richiesta, espressa nel bando, di avere tre piani per moduli di ricerca intercambiabili è stata tradotta nell'inserimento di container preallestiti grazie ad un elevatore per container.
I laboratori mobili giungono al sito di progetto mediante trasporto su ruota e vengono scaricati nell'area limitrofa all'edificio preesistente. L'ingresso avviene dall'apertura al piano terra posta a Sud-Est. L'elevatore è collocato in posizione più baricentrica rispetto all'ingresso li-

mitando al minimo lo spostamento degli altri container. Gli impianti di aerazione non interferiscono con la movimentazione dei laboratori preallestiti che verranno connessi tramite una soluzione *plug and play* agli impianti di riscaldamento, di aerazione forzata ed elettrici, posto sul soffitto.

In seguito all'osservazione del regime pluviometrico di Burgdorf, sono stati inseriti sistemi per minimizzare il consumo totale di acqua, massimizzare l'uso dell'acqua piovana come fonte alternativa e ridurre lo scarico di acque reflue. Le acque piovane vengono quindi captate sulla copertura grazie alla tecnologia blue roof e successivamente incanalate, mediante i pluviali, nel bacino di raccolta interrato limitrofo all'area facendo fronte a periodi di siccità prolungata. Le acque grigie verranno anch'esse raccolte in un secondo bacino e dopo il loro trattamento potranno essere utilizzate per i wc.

Il caso studio della Circular Tower affronta la tematica della sostenibilità attraverso i principi dell'Economia Circolare, resi operativi dai processi di conservazione del valore (ridurre, riutilizzare, riparare, rifabbricare e riciclare).
In previsione della fine del ciclo vita della torre dopo solo 30 anni, al fine di prolungare la vita utile dei prodotti impiegati è stata applicata la metodologia di progettazione *Design for*

Deconstrution. In tal modo è stato necessario predisporre le componenti di involucro come prefabbricate ottenendo benefici in termini di sicurezza e di tempistiche nella fase di costruzione grazie alle connessioni a secco. Inoltre, permette di velocizzare di svolgere una decostruzione selettiva per lo smantellamento a fine vita e per eventuali manutenzioni. Il DfD consente di mantenere il valore economico dei componenti decostruiti, limitando la produzione di rifiuti.
I suddetti componenti, provenienti da fonti naturali e contenenti elevate quantità di materiale riciclato, sono stati selezionati in relazione ai loro possibili scenari di fine vita (EoL), per applicare il processo *closing the loop*.
Nonostante siano attive diverse iniziative nell'ambito della circolarità, sussistono ancora significative limitazioni nel reimpiego del legno strutturale, seppur alcuni casi sperimentali ne dimostrino la fattibilità e il vantaggio economico e ambientale. Il riutilizzo del legno strutturale è tecnicamente possibile, posticipando il suo impiego come massa termica.

Tutti i prodotti che compongono il manufatto edilizio sono stati selezionati in seguito alle analisi LCA effettuate nella fase di *concept design*, con il software ZPF, richiesto dal bando di concorso.
Dal confronto dell'analisi LCA effettuata con

ZPF con quella eseguita tramite SimaPro e OneClick si è compreso che l'utilizzo di ZPF-tool è ottimale unicamente in fase di *concept design* poiché la limitata banca dati, il basso livello di personalizzazione degli input delle componenti tecnologiche e la connotazione *site specific* ne escludono un utilizzo professionale. Al contrario, SimaPro e OneClick LCA si presentano ottimali in tutte le fasi di progettazione grazie all'imputazione flessibile dei dati. A favore di OneClick LCA è da menzionare l'interoperabilità con programmi BIM al fine di ridurre le operazioni di inventario.

Gli output forniti dai tre software non sono pienamente confrontabili a causa dei diversi metodi di calcolo che offrono. È stato perciò necessario uniformare i confini di sistema ed elaborare i risultati. Gli esiti dell'analisi ottenuti con SimaPro e OneClick LCA si confermano a vicenda, mentre quelli di ZPF risultano più elevati. Il dato calcolato da quest'ultimo di Global Warming Potential è superiore ma ritenuto accettabile poiché giustificato dalle approssimazioni dei materiali in prodotti generici. Invece, il dato di EP non rinnovabile prodotto da ZPF si discosta notevolmente dalla media ottenuta dagli altri due programmi. La motivazione può risiedere nella mancata indicazione dell'esatto confine del sistema.

I solai rappresentano l'elemento tecnico più impattante tra quelli analizzati. In seguito a uno

studio più dettagliato realizzato con SimaPro, è emerso che i componenti vetrati (non calcolabili con ZPF) hanno un impatto notevolmente più elevato e di conseguenza non andrebbe trascurato.

Dunque, le pratiche di DfD come espressione dei principi di circolarità, correlate allo sviluppo dell'analisi LCA, applicate al caso studio della Circular Tower ha espresso la possibilità di convergere in un unico prodotto edilizio diversi temi nell'ambito della sostenibilità.
Grazie allo studio e alle molteplici osservazioni e confronti svolti in merito all'LCA in fase di *concept design* è stato possible smentire la difficoltà e la laboriosità spesso attribuite a questa metodologia da parte dei progettisti. È infatti possibile concludere che l'analisi di impatto può essere svolta mediante semplici fogli di calcolo, che introducono a un primo approccio al tema, generando significative migliorie in termini di impatti ambientali.

Indice delle figure

Figura 1	Planimetria dei vincoli progettuali.	25
Figura 2	Logo dell'associazione TecLab .	27
Figura 3	Foto aerea rilevata a 30 m di altezza sull'area di progetto. Vista Nord-Ovest.	30
Figura 4	Foto aerea rilevata a 20 m di altezza sull'area di progetto. Vista Sud-Est.	31
Figura 5	Schema rappresentante la suddivisione delle aree svizzere all'interno del Canton Berna.	33
Figura 6	Schema rappresentante le principali suddivisioni amministrative del territorio svizzero.	33
Figura 7	Schema rappresentante la città di Burgdorf.	35
Figura 8	Analisi dei dati climatici nei mesi di gennaio, febbraio e marzo con il Diagramma Givoni.	40
Figura 9	Analisi dei dati climatici nei mesi di aprile, maggio e giugno con il Diagramma Givoni.	42
Figura 10	Analisi dei dati climatici nei mesi di luglio, agosto e settembre con il Diagramma Givoni.	44
Figura 11	Analisi dei dati climatici nei mesi di ottobre, novembre e dicembre con il Diagramma Givoni.	46
Figura 12	Le warming stripes del canton di Berna.	49
Figura 13	Variazione della temperatura media annuale in Svizzera.	49
Figura 14	Grafico rappresentante la temperatura di bulbo secco della stazione termoigropluvioanimetrica di Lagnau.	50
Figura 15	Precipitazioni medie mensili.	51
Figura 16	Percezione delle temperature.	51
Figura 17	Grafico rappresentante la velocità del vento.	52
Figura 18	Grafico rappresentante la direzione e la velocità del vento.	52
Figura 19	Grafico rappresentante le ore di luce nel 2021.	53
Figura 20	Grafico rappresentate la nuvolosità.	53
Figura 21	Strategie bioclimatiche impiegabili nel caso studio della Circular Tower.	55
Figura 22	Cartografia rappresentante il tessuto urbano scala 1:10'000.	57
Figura 23	Cartografia rappresentante il tessuto urbano scala 1:5'000.	59
Figura 24	L'area di progetto.	61
Figura 25	La maschera d'ombra dell'area di progetto.	62

Figura 26	Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 marzo ore 12:00, riportato in una planimetria schematica.	63
Figura 27	Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 giugno ore 12:00, riportato in una planimetria schematica.	63
Figura 28	Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 settembre ore 12:00, riportato in una planimetria schematica.	64
Figura 29	Ombreggiamento dell'area di progetto, il 21 dicembre ore 12:00, riportato in una planimetria schematica.	64
Figura 30	Tabella dell'analisi SWOT.	67
Figura 31	Navigatore fotografico del contesto di progetto.	68
Figura 32	Navigatore fotografico dell'area di progetto.	74
Figura 33	Metaprogetto.	87
Figura 34	Le utenze e gli ambienti dedicati.	88
Figura 35	Tipologia di utilizzo degli ambienti da parte degli ospiti.	89
Figura 36	Concept-volumes.	91
Figura 37	Concept-functions.	93
Figura 38	Concept-energy.	94
Figura 39	Concept-accessibility.	97
Figura 40	Vista esterna della Circualr Tower.	98
Figura 41	Masterplan.	100
Figura 42	Planimetria del piano terra, scala 1:200.	103
Figura 43	Planimetria del primo piano, scala 1:200.	103
Figura 44	Planimetria del secondo piano, scala 1:200.	104
Figura 45	Planimetria del terzo piano, scala 1:200.	104
Figura 46	Planimetria del quarto piano, scala 1:200.	106
Figura 47	Planimetria del quinto piano, scala 1:200.	107
Figura 48	Planimetria del sesto piano, scala 1:200.	108
Figura 49	Planimetria del settimo piano, scala 1:200.	108
Figura 50	Prospetto Est, scala 1:200.	110
Figura 51	Prospetto Sud, scala 1:200.	111
Figura 52	Prospetto Nord, scala 1:200.	112
Figura 53	Prospetto Ovest, scala 1:200.	113
Figura 54	Sezione BB, scala 1:200.	114
Figura 55	Sezione CC, scala 1:200.	115
Figura 56	L'elevatore di container.	117
Figura 57	L'elevatore di container.	117

Figura 58	Schema della movimentazione dei container.	118
Figura 59	Layout di configurazione e funzioni ipotizzate dei container.	120
Figura 60	Sezione prospettica della Circualr Tower.	123
Figura 61	Installazione e funzionamento dei container.	124
Figura 62	Funzionamento schematizzato delle serre nel periodo invernale ed estivo.	127
Figura 63	Sezione prospettica tipo di una serra bioclimatica della Circular Tower.	128
Figura 64	Indicazioni sul collocamento e sulle caratteristiche tecniche dei pannelli fotovoltaici della Circular Tower.	131
Figura 65	Sezione schematica del ciclo dell'acqua nella Circular Tower.	133
Figura 66	Stratigrafia del sistema blue roof utilizzato nel solaio di copertura della Circular tower.	135
Figura 67	Schema sul percorso più breve per raggiungere il luogo sicuro all'esterno dell'edificio.	137
Figura 68	Schemi grafici delle vie di evacuazione in ogni piano della struttura.	139
Figura 69	Assonometria strutturale esplosa, elementi primari.	141
Figura 70	Schema di cantiere.	142
Figura 71	Schema di assemblaggio, fase 1.	145
Figura 72	Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone i solai interpiano.	146
Figura 73	Schema di assemblaggio, fase 2.	147
Figura 74	Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone le pareti del vano scala.	148
Figura 75	Schema di assemblaggio, fase 3.	149
Figura 76	Esploso assonometrico di un pannello prefabbricato che compone l'involucro del volume principale.	150
Figura 77	Schema di assemblaggio, fase 4.	151
Figura 78	Assonometria costruttiva della Circular Tower.	153
Figura 79	Dettaglio assonometrico del nodo trave-pilastro .	152
Figura 80	Vista del progetto vincitore del concorso .	155
Figura 81	Vista assonometrica del progetto vincitore del concorso .	157
Figura 82	Le origini delle fonti energetiche e i settori in cui vengono utilizzate.	162
Figura 83	Le risorse e le riserve.	163
Figura 84	Utilizzo materiali, produzione rifiuti e emissioni derivanti dal settore edile.	165

Figura 85	I GHG identificati dal Protocollo di Kyoto.	166
Figura 86	Quantità in percentuale dei gas killer.	167
Figura 87	I 17 Sustainable Goals suddivisi per categoria.	171
Figura 88	L'Embodied Carbon derivante dal settore delle costruzioni.	176
Figura 89	La decarbonizzazione dell'OP.	177
Figura 90	Indicatori ambientali e dell'uso delle risorse.	178
Figura 91	Diagramma della valutazione del ciclo vita LCA.	181
Figura 92	I confini del sistema.	189
Figura 93	Le fasi dell'LCA in edilizia.	195
Figura 94	Le informazioni sulla valutazione dell'edificio suddivise nei moduli standard.	195
Figura 95	Fasi dello studio LCA: ruolo del progettista e del team LCA.	196
Figura 96	Il processo dell'LCI.	197
Figura 97	Quantità e origine dei dati adattati ad ogni fase del progetto per l'analisi LCA.	198
Figura 98	Il sistema dell'edificio.	199
Figura 99	Come cambia l'analisi LCA per ogni fase del progetto.	200
Figura 100	Le opportunità di riduzione dell'EC nelle fasi della progettazione.	201
Figura 101	Gli impatti del GWP nel ciclo vita dell'edificio.	201
Figura 102	Schermata tipo della sezione per la compilazione dei dati di un solaio interpiano nel software ZPF.	205
Figura 103	Tabella riassuntiva nel foglio "Veduta generale" del software ZPF.	206
Figura 104	Quantità degli impatti ambientali in percentuale dei materiali nel componente "facciata".	214
Figura 105	Schermata tipo della sezione per la compilazione dei dati delle chiusure verticali opache nel software ZPF.	107
Figura 106	Confine del sistema nell'analisi LCA mediante ZFP-tool.	215
Figura 107	Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software ZPF.	216
Figura 108	Grafico a torta dei risultati UBP della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.	218
Figura 109	Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO2eq della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.	219
Figura 110	Grafico a torta dei risultati del consumo di energia primaria da fonte non rinnovabile della Circular Tower ottenuto mediante ZPF-tool.	221

Figura 111	Grafico a barre dei risultati a confronto con i benchmark ottenuto mediante ZPF-tool.	221
Figura 112	Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software ZPF.	222
Figura 113	Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO2eq della Circular Tower escludendo la voce “tecniche della casa“. ZPF	224
Figura 114	Grafico a barre dei risultati sulle emissioni di CO2eq della Circular Tower escludendo la voce “tecniche della casa“. ZPF	224
Figura 115	Grafico a torta dei risultati del consumo di EP da fonte non rinnovabile escludendo la voce “tecniche della casa“. ZPF	225
Figura 116	Grafico a barre dei risultati del consumo di EP da fonte non rinnovabile escludendo la voce “tecniche della casa“. ZPF	225
Figura 117	Tabella dei database utilizzati tra quelli disponibili nel software SimaPro.	235
Figura 118	Tabella dei metodi di calcolo utilizzati tra quelli disponibili nel software SimaPro.	237
Figura 119	Confine del sistema nell’analisi LCA mediante SimaPro.	239
Figura 120	Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software SimaPro.	241
Figura 121	Diagramma ad albero del consumo in percentuale di EP dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo CED, software SimaPro. Livello di dettaglio>10%	245
Figura 122	Diagramma ad albero del consumo in MJ di EP dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo CED, software SimaPro. Livello di dettaglio>10%.	247
Figura 123	Diagramma ad albero delle emissioni in percentuale di CO2eq dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo IPCC 100 a del 2013, software SimaPro. Livello di dettaglio>3%.	249
Figura 124	Diagramma ad albero delle emissioni in kg di CO2eq dei componenti della Circular Tower, ottenuto mediante metodologia di calcolo IPCC 100 a del 2013, software SimaPro. Livello di dettaglio>3%.	251
Figura 125	Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software SimaPro.	253
Figura 126	Diagramma che mostra le emissioni di CO2eq dei materiali in rapporto alla loro quantità in kg.	255
Figura 127	Diagramma che mostra il consumo di EP impiegata per la realizzazione dei materiali in rapporto alla loro quantità in kg.	255

Figura 128	Grafico a torta dei risultati sulle emissioni di CO2eq della Circular Tower. SimaPro.	256
Figura 129	Grafico a barre dei risultati sulle emissioni di CO2eq della Circular Tower. SimaPro	256
Figura 130	Grafico a torta dei risultati del consumo di EP. SimaPro	257
Figura 131	Grafico a barre dei risultati del consumo di EP. SimaPro	257
Figura 132	Schermata acquisita della sezione “settings” di OneClick LCA.	264
Figura 133	Schermata acquisita dalla sezione “Detailed scope“ di OneClick LCA che mostra le famiglie prese in analisi.	264
Figura 134	Schermata acquisita dal plug-in di OneClick LCA che mostra la sezione “Materials”.	266
Figura 135	Confine del sistema nell’analisi LCA mediante SimaPro.	268
Figura 136	Diagramma Sankey delle operazioni di inventario effettuate per il software OneClick LCA.	270
Figura 137	Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti mediante software OneClick LCA.	271
Figura 138	Grafico a torta rappresentante l’EP totale relativa ai componenti della Circular Tower, ottenuto con il software OneClick LCA.	272
Figura 139	Grafico a torta rappresentante le emissioni di CO2 relative ai componenti della Circular Tower, ottenuto con il software OneClick LCA.	272
Figura 140	Diagramma a bolle che rappresenta le quantità di CO2 emesse dai materiali in relazione alle loro quantità.	273
Figura 141	Schermata acquisita da OneClick LCA nella sezione dei risultati.	273
Figura 142	Risultati dell’EP ottenuti dal software OneClick LCA rielaborati al fine del confronto.	275
Figura 143	Schema riassuntivo del processo di analisi effettuato con il software OneClick LCA.	276
Figura 144	Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti da ZPF-tool, SimaPro e OeClick LCA confrontabili.	282
Figura 145	Grafico a barre che riporta i risultati di EP non rinnovabile di ZPF-tool, SimaPro e OneClick LCA.	283
Figura 146	Grafico a barre che riporta i risultati di EP totale di SimaPro e OneClick LCA.	284
Figura 147	Tabella riassuntiva di confronto delle caratteristiche dei software.	287
Figura 148	Grafici dei risultati ottenuti dai tre software a confronto.	288
Figura 149	La collocazione del DfD nei moduli standardizzati del ciclo vita.	293
Figura 150	Funzionamento dell’economia circolare.	295

Figura 151	Alcuni simboli dell'eco-design.	297
Figura 152	La gerarchia della gestione sostenibile delle risorse.	299
Figura 153	Tipi e finalità del fine vita degli edifici.	331
Figura 154	DfD durante i processi di progettazione.	343
Figura 155	Pilastro strutturale con incastro e staffe a scomparsa.	347
Figura 156	Fissaggio delle travi al pilastro tramite bullonatura.	347
Figura 157	Posa dei solai prefabbricati.	349
Figura 158	Solaio fissato tramite scarpe metalliche.	349
Figura 159	Completamento della posa dei solai prefabbricati.	351
Figura 160	Posa del pilastro tramite incastro.	351
Figura 161	La gerarchia della gestione dei rifiuti.	353
Figura 162	Possibili scenari di fine vita dei materiali edili	354
Figura 163	Le tipologie e le quantità dei materiali della Circular Tower.	361
Figura 164	Potenziale a cascata del legno di pino.	367
Figura 165	Diagramma dei sistemi di economia circolare.	369
Figura 166	Illustrazione della circolarità del legno ed il suo ciclo del carbonio.	371
Figura 167	Modifica del ciclo di vita dell'ambiente costruito, da un modello lineare a un modello ciclico attraverso lo smantellamento degli edifici.	375
Figura 168	Le strutture portanti MAI realizzate con i pannelli X-lam di recupero dell'edificio SOFIE di 7 piani.	385
Figura 169	Confronto tra i potenziali scenari di fine vita di alcune tipologie di isolante.	390
Figura 170	Quadro concettuale del ciclo del legno nell'edilizia.	391
Figura 171	Schema semplificato dell'impianto di riciclaggio delle membrane.	394

Bibliografia e sitografia

© 2021 One Click LCA LtdAll rights reserved. (2021). Decarbonizing construction Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon. https://www.oneclicklca.com/decarbonizing-construction-report/

Advancing Net Zero. (2022). World Green Building Council. https://worldgbc.org/

Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste Management, 60, 3–13.

Alig, M., Frischknecht, R., Nathani, C., Hellmuller, P., & Stolz, P. (2018). Umweltatlas Lieferketten Schweiz. Treeze Ltd & Rutter Societaco AG.

Ashby, M. (2012). Preview View on ScienceDirect Materials and the Environment Eco-informed Material Choice.

Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). Analisi del ciclo di vita LCA. Edizioni Ambiente.

Bassi, F., & Dias, J. G. (2019). The use of circular economy practices in SMEs across the EU. Resources, Conservation and Recycling, 146, 523–533.

Bergman, R. D. (2012). The effect on climate change impacts for building products when including the timing of greenhouse gas emissions [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Wisconsin-Madison.

Bern Climate, Weather By Month, Average Temperature (Switzerland) - Weather Spark. (2022). https://weatherspark.com/y/56086/Average-Weather-in-Bern-Switzerland-Year-Round

Bilal, M., Khan, K. I. A., Thaheem, M. J., & Nasir, A. R. (2020). Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework. Journal of Cleaner Production, 276, 123250.

BioRegional Development Group. (2012). Reuse and recycling on the London 2012 Olympic Park: Lessons for demolition, construction and regeneration.

Blomsma, F., Pieroni, M., Kravchenko, M., Pigosso, D. C., Hildenbrand, J., Kristinsdottir, A. R., Kristoffersen, E., Shahbazi, S., Nielsen, K. D., Jönbrink, A. K., Li, J., Wiik, C., & McAloone, T. C. (2019). Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. Journal of Cleaner Production, 241, 118271.

Böni, H., & Hischier, R. (2018). Weiter- und Wiederverwendung von elektrischen und elektronischen Geräten. In Ökologische und ökonomische Analyse. Empa.

Borlenghi, R. (2008). Guida alle norme ISO 14000. Hoepli.

Bressanelli, G., Saccani, N., Pigosso, D. C., & Perona, M. (2020). Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda. Sustainable Production and Consumption, 23, 174–188.

Briani, A., Simeone, P., & Ceccotti, A. (2012). MAI, Ivalsa modular hose - Timber Design Society. yumpu.com. https://www.yumpu.com/en/document/read/12383373/00402-a-rio-ceccotti-timber-design-society

Brismark, J. (2020). Riutilizzo e riutilizzabilità nel settore delle costruzioni - Uno studio sulle barriere e sulle opportunità di sviluppo con particolare attenzione al legno lamellare incrociato. Environmental and Energy Systems Studies.

Brossa, E., & Cipolla, S. (2014). L'uso del legno per l'edilizia sostenibile: analisi LCCA per una progettazione consapevole [Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile]. Politecnico di Torino.

BSI, scarpe metalliche ad ali interne. (2019). Rothoblaas. https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/piastre-e-connettori/scarpe-metalliche/bsi

Building a Circular Future (3rd ed.). (2016). Danish Environmental Protection Agency.
Camilleri, M. (2018). Closing the loop for resource efficiency, sustainable consumption and production: a critical review of the circular economy. International Journal of Sustainable Development, 1, 1.

Camilleri, M. A. (2018). The circular economy's closed loop and product service systems for sustainable development: review and appraisal. Sustainable Development, 27(3), 530–536.

Campagnoli, A. (2018). Soluzioni progettuali per la sostenibilità idrica degli edifici – l'edificio residenziale monofamiliare [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino.

Catarina Thormark. (2001). Assessing the recycling potential in buildings. CIB Task Group 39: Deconstruction and Materials Reuse: Technology, Economic, and Policy., 78–86.

Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S. (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. Construction and Building Materials, 114, 681–687. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001

Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. Energy, 34(12), 2116–2123.
Circle Economy. (2019). The Circularity Gap Report: Closing the Circularity Gap in a 9% World. Circle Economy.

Circular economy action plan. (2020). Environment. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\CHE_Switzerland. (2019). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html

Coal Combustion Residual Beneficial Use Evaluation: Fly Ash Concrete and FGD Gypsum Wallboard. (2014). United States Environmental Protection Agency.

Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. (2015). European commission.

Comunicato stampa Nuove regole per elettrodomestici più sostenibili. (2019). Commissione Europea.

Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. (2011). Tabella Di Marcia Verso Un'economia Competitiva a Basse Emissioni Di Carbonio Al 2050.

Comunicazione della Commissione Europea al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse. (2011). In EUR-Lex (COM(2011) 571). Commissione Europea.

Comunicazione Mercati dei materiali di base e materie prime: sfide e approcci risolutivi. (2011). Commissione Europea.

Consoli, F., Allen, D., Boustead, J., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Seguin, J., & Vigon, B. (2019). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice." Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

COP. (2019). Dipartimento per Le Politiche Europee. Retrieved November 4, 2022, from https://www.politicheeuropee.gov.it/it/comunicazione/euroacronimi/cop-1/

Cos'è e come funziona una discarica controllata. (2019, November 14). Green Cluster. Retrieved November 9, 2022, from http://greencluster.it/cose-e-come-funziona-una-discarica-controllata/

Cristescu, C., Honfi, D., Sandberg, K., Sandin, Y., Shotton, E., Walsh, S. J., Cramer, M., Ridley-Ellis, D., Risse, M., Ivanica, R., Harte, A., Uí Chúláin, C., De Arana-Fernández, M., Llana, D. F., Íñiguez-González, G., Barbero, M. G., Nasiri, B., Hughes, M., & Krofl, Ž. (2020). Design for deconstruction and reuse of timber structures – state of the art review. InFutureWood, 1(1).
Crowther, P. (2005). Design for Disassembly - Themes and principles. Environment Design Guide.

Curran, M. A. (2006). Report on Activity of Task Force 1: Data Registry - Global Life Cycle Inventory Data Resources. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11(4), 284–289.

Damanhuri, E. (2012). Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production. IntechOpen.

Debacker, W., & Manshoven, S. (2016). Synthesis of the state-of-the-art: Key barriers and opportunities for materials passports and reversible building design in the current system. BAMB. https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/03/D1_Synthesis-report-on-State-of-the-art_20161129_FINAL.pdf

Densley Tingley, D. (2013). Design for Deconstruction: an appraisal [PhD thesis]. University of Sheffield.

Department of the Environment, Transpot and the Regions. (1998). Opportunities for Change: Consultation Paper on a UK Strategy for Sustainable Construction. HMSO.

Dietsch, P., & Kreuzinger, H. (2011). Guideline on the assessment of timber structures: Summary. Engineering Structures, 33(11), 2983–2986. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.027

Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles (OJ L 269 21.10.2000 p. 34). (2006). Documents in European Community Environmental Law, 698–715.

Direttiva (UE) 2018/849 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Direttiva (UE) 2018/850 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Direttiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Direttiva (UE) 2018/852 del Parlamento europeo e del Consiglio. (2018). In EUR-Lex. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Disposal of OSB. (2016, December 22). West Fraser - Integrated Forestry Company. Retrieved November 9, 2022, from https://osb.westfraser.com/blog/disposal-of-osb/
Durmisevic, E., & Yeang, K. (2009). Designing for Disassembly (DfD). Architectural Design, 79(6), 134–137.

Echols, A., & Guy, B. (2012). Survey of Attendees. Building Materials Reuse Association Conference, Oakland , CA, United States of America.

ecoinvent Database. (2022, October 13). Ecoinvent. Retrieved November 5, 2022, from https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/

Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi. (2015, December 2). Attualità Parlamento Europeo. Retrieved October 19, 2022, from https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi

Economia circolare: in che modo l'UE intende realizzarla entro il 2050? (2022, October 10). Europarl. Retrieved September 13, 2022, from https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modo-l-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050

Ed Hawkins, climate scientist, University of Reading. http://www.met.reading.ac.uk/%7Ed/home/index.php

Efficienza delle risorse ed economia circolare | Note tematiche sull'Unione europea | Parlamento Europeo. (2022, September 1). https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/76/efficienza-delle-risorse-ed-economia-circolare

Embodied Carbon Primer | LETI. (2022). Leti. https://www.leti.uk/ecp

ENEA. (2020). La simbiosi industriale: Progetto CREIAMO, Casi studio ENEA e Rete SUN.

Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. (2007). ISO/TC 207/SC 5 Life Cycle Assessment, 2. https://www.iso.org/standard/37456.html

Environmental Product Declaration for Laminated Veneer Lumber. (2013). American Wood Council.

Environmental Product Declaration in accordance whit ISO 14025 and EN 15804 Gyproc Wallboard. (2016). Gyproc.

Environmental Product Declaration in accordance whit ISO 14025 and EN 15804, Plasterboard. (2022). Knauf.

Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025 and EN 15804 for: CLT (Cross Laminated Timber). (2020). Stora Enso.

Environmental Product Declaration, ISO 14025 and EN 15804 CLT. (2019). Binderholz Bausysteme GmbH.

Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale (EN ISO 7730:2006). (2016). UNI.

Fachinformationen Wirtischaft und Konsum. (2021, December 31). bafu.admin.ch.

Fan, Y. V., Lee, C. T., Lim, J. S., & Klemes, J. J. (2019). Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy Author links open overlay panel. Cleaner Production, 232, 1482–1491.

Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. Journal of Cleaner Production, 228, 882–900.

Fink, G., & Kohler, J. (2011). A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures. Engineering Structures, 33(11), 2962–2968. http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.028

Fraanje, P. J. (1997). Cascading of pine wood. Resources, Conservation and Recycling, 19(1), 21–28. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(96)01159-7

Frischknecht, R., & Jungbluth, N. (2003). Attuazione dei metodi di valutazione dell'impatto del ciclo vitale. Rapporto finale ecoinvent 2000. Centro Svizzero per LCI.

Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2017). The circular economy and circular economic concepts-a literature analysis and redefinition. Thunderbird International Business Review, 60(5), 771–782.

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11–32.

Giavarini, C. (2021). Il riciclaggio nel conglomerato bituminoso delle membrane bitume-polimero: Recycling in the asphalt mix of membranes made of bitumen and polymers. SITEB.
Giavarini, C., & Santarelli, L. (1994). Membrane bituminose contenenti nuovi polimeri olefinici. Rassegna Del Bitume, 28, 13.

GLI OBIETTIVI DELLA COP26. (2021, October 26). UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021. Retrieved November 4, 2022, from https://ukcop26.org/it/gli-obiettivi-della-cop26/

Gorgolewski, M. (2008). Designing with reused building components: some challenges. Building Research &Amp; Information, 36(2), 175–188.

GreenClimateCities. (2022). ICLEI's Climate Neutrality Framework. ICLEI.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2010). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. Environmental Science &Amp; Technology, 45(1), 90–96.

Guy, B., & Ciarimboli, N. (2005). Design for disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Pennsylvania State University: University Park.

Hansson, M., & Isaksson, T. (2006). Simulation of Load Carrying Capacity of Sheathed Parallel Timber Beam Structure. Journal of the Institute of Wood Science, 17(3).

Hedberg, A., & Šipka, S. (2020). The circular economy: Going digital. European Policy Center.

Hellweg, S., & Heeren, N. (2018). Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows (1st ed., Vol. 23). Journal of industrial ecology.

Holz Von Hier. (2018). Wood fiber insulation. Interreg Alpine Space CaSco.

Homrich, A. S., Galvão, G., Abadia, L. G., & Carvalho, M. M. (2018). The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. Journal of Cleaner Production, 175, 525–543.

Hradil, P. (2014). Barriers and opportunities of structural elements re-use. Research Raport. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo.

Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2016a). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 8, Vie d'evacuazione).

Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2016b). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 7, Rampe di scale e uscite).

Indicazioni relative all'Ordinanza 4 concernente la legge sul lavoro. (2020). In Capitolo 2: Costruzione E Trasformazione Di Aziende Con Obbligo Di Approvazione Dei Piani (Art. 10, porte e uscite con accesso a vie d'evacuazione).

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2016, May 2). Dichiarazione Ambientale di Prodotto per ISO 14025 e EN 15804. www.betonwood.com.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2020, November 20). Dichiarazione Ambientale di Prodotto per ISO 14025 e EN 15804. www.betonwood.com.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). IPCC. Retrieved November 5, 2022, from https://www.ipcc.ch/

Irle, M., Privat, F., Deroubaix, G., & Belloncle, C. (2015). Intelligent recycling of solid wood. Pro Ligno 11.

J. Bastos, M. Rizzari, E. Agosti, V. D'Alonzo, & C. Hoffmann. (2021). Analisi dello stato dell'arte: Report sui settori e attività produttive per promuovere l'Economia Circolare.

Jahan, I., Zhang, G., Bhuiyan, M., & Navaratnam, S. (2022). Circular Economy of Construction and Demolition Wood Waste—A Theoretical Framework Approach. Sustainability, 14(17).

Jaillon, L., & Poon, C. (2010). Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction. Construction Management and Economics, 28(10), 1025–1042.

Jensen, A. A., Hoffman, L., Moller, B., Schmidt, A., Christiansen, K., Berendsen, S., & Elkington, J. (2001). Life-cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources. A report prepared for and published by the European Environment Agency (EEA). Environmental Issues Series, 6.

Kanters, J. (2018). Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. Buildings, 8(11), 150.

Kanters, J., & Horvat, M. (2012). The Design Process known as IDP: A Discussion. Energy Procedia, 30, 1153–1162.

Kazmipaw. (2018). Summary report - EEA webinar on recently adopted national CE policies. Eionet Forum.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221–232.

Krivit, D. (2007). Recycling tear-off asphalt shingles: best practice guide. CMRA.

Kronospan. (2018). Environmental Product Declaration According to EN 15804 and ISO 14025. Kronospan OSB, Spol. S r.o.

Lansink, A. (2018). Challenging Changes – Connecting Waste Hierarchy and Circular Economy. International Solid Waste Association, 36(10).

Lesar, B., Humar, M., Hora, G., Hachmeister, P., Schmiedl, D., Pindel, E., Siika-aho, M., & Liitiä, T. (2016). Utilization of recycled wood in biorefineries: preliminary results of steam explosion and ethanol/water organosolv pulping without a catalyst. European Journal of Wood and Wood Products, 74(5), 711–723. https://doi.org/10.1007/s00107-016-1064-8

LETI group. (2022). Embodied Carbon Primer. In LETI.

Lippke, B. R., Wilson, J., Perez-Garcia, J., & Bowyer, J. (2004). CORRIM: Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials. Forest Products Journal, 4(56).

LOI. (2012). Definire obiettivi comuni per una transizione energetica di successo, rafforzare l'indipendenza energetica e la competitività economica della Francia, preservare la salute umana e l'ambiente e combattere il cambiamento climatico (articoli da 1 a 2). Repubblica Francese.

Lovins, A. B., & Hawken, P. (2003). Capitalismo naturale. La prossima rivoluzione industriale.

Lundmark, T. (2020). The forest is not enough for all needs, how should we prioritize? (Skogen räcker inte - hur ska vi prioritera?). Future Forests Report. Swedish Agricultural University (SLU).

MacArthur, E. (2020). The circular economy in detail. Foundation.

Malabi Eberhardt, L. C., Van Stijn, A., Stranddorf, L. K., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2021). Environmental Design Guidelines for Circular Building Components: The Case of the Circular Building Structure. Abdollah Shafieezadeh.

Manfredi, M. (2015). Applicazione della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione della sostenibilità ambientale di prodotti, processi e tecnologie del settore agro-alimentare [Dottorato di ricerca in INGEGNERIA INDUSTRIALE Ciclo XXVII°]. Università di Parma. Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Manghi, E. (2021). Architettura modulare prefabbricata [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino.

Manning, H. J. (1830). The Portable Cottage. Inghilterra.

Mantau U., Leek N., Saal U., Leek N., Oldenburger J., Asikainen A., Anttila P., Prins K., Lindner M., Verkerk H., & Eggers J. (2007). Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report.

Marugg, F. (2022, August 8). Stadt aus Holz. Wüest Partner. Retrieved November 5, 2022, from https://www.wuestpartner.com/ch-de/2022/08/04/stadt-aus-holz/

Materiali per il costruire sostenibile. (2018). Fermacell.

Michael Martin, & Amin Parsapour. (2012). Upcycling wastes with biogas production: An exergy and economic analysis. Venice 2012: International Symposium on Energy From Biomass and Waste.

Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.

(2019). In Der Europäische Grüne Deal. Europaische Kommission.

Morgan, J., Mitchell, P., Ellen MacArthur Foundation, & Club of Rome. (2022). Employment and the circular economy Job creation in a more re-source efficient Britain. Green Alliance.

Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 153, 104553.

Nava, C. (2019). cambiamenti climatici ed economia circolare: tecnologie abilitanti e life cycle thinking per lo sviluppo sostenibile. ArcHistoR, 6.

Nazioni Unite. (2022, March 30). ONU Italia La nuova Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. ONU Italia. Retrieved November 4, 2022, from https://unric.org/it/agenda-2030/

Ndukwe, I., & Yuan, Q. (2016). Drywall (Gyproc Plasterboard) Recycling and Reuse as a Compost-Bulking Agent in Canada and North America: A Review. Recycling, 1(3), 311–320.

Office, F. S. (2022). Input-Output Tables. Federal Statistical Office. Retrieved November 5, 2022, from https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/statistics/national-economy/input-output.html

One Click LCA Ltd. (2021). Life Cycle Assessment for building Perché è importante. https://oneclicklca.drift.click/building-lca-ebook

Onyx Solar - Photovoltaic Glass for Buildings. (2020). https://www.onyxsolar.com/it/

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). Business Models for the Circular Economy. In Opportunities and Challenges for Policy. OECD.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2017). Umweltprufbericht: Schweiz 2017. OECD.

Organizzazione delle Nazioni Unite. (2015). Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015.

Owens, J. W. (1998). Life cycle impact assessment: The use of subjective judgements in classification and characterization. The International Journal of Life Cycle Assessment, 3(1), 43–46. https://doi.org/10.1007/bf02978451

Paetz, A. G., Dütschke, E., & Fichtner, W. (2011). Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions. Journal of Consumer Policy, 35(1), 23–41. https://doi.org/10.1007/s10603-011-9177-2

Pagliolico, S. (2021). Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali. Politecnico di Torino. Lezione frontale, Torino, Italy.

PALFINGER AG. (2020). Container Elevators | PALFINGER MARINE. https://www.palfinger-marine.com/en/deck-equipment/access-equipment/container-elevators

Papa Francesco. (2015). Lettera enciclica sulla cura della casa comune.

PD: Psychrometric Chart. (2022). https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html

Peng, C. L., Scorpio, D. E., & Kibert, C. J. (1997). Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. Construction Management & Economics, 15(1), 49–58.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40(3), 394–398.

Philipp Dietsch, & Jochen Köhler. (2010). Assessment of Timber Structures (1st ed.). ShakerEditor.

Piastre e connettori per legno. (2019). In Rothoblaas. Rothoblaas. https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/piastre-e-connettori

Plasterboard. (2017). Planet Ark Business Recycling. https://businessrecycling.com.au/recycle/plasterboard

Plasterboard removal. (2010). Department of Environment, Climate Change and Water NSW.

Pollo, R. (2014). Un approccio consapevole alla progettazione : dall' LCA al BIM. [Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile]. Politecnico di Torino.

Privat, F. [François P. (2019). Faisabilité du recyclage en boucle fermée des déchets post-consommateurs en bois massif. École Supérieure Du Bois.

Progetto SOFIE. (2011). Consiglio Nazionale Delle Ricerche.

Proposta di Direttiva del Consiglio che modifica la Direttiva 2006/112/CE in materia di aliquote IVA. (2018). Commissione Europea.

Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 333–359.

Recycling, upcycling, downcycling: quali sono le differenze? (2021, September 8). Veracura. Retrieved November 9, 2022, from https://veracura.network/recycling-upcycling-downcycling/

Reusewood.org. (2020). Retrieved November 9, 2022, from https://reusewood.org/guide/oriented-strand-board

Rifiuti Inerti | Laboratorio Analisi e Classificazione Ecoopera. (2022). Retrieved November 9, 2022, from https://www.ecoopera.coop/it/laboratorio-analisi-ambientali/analisi-rifiuti/rifiuti-inerti/

Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015a). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Procedia Engineering, 118, 1296–1304.

Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015b). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Procedia Engineering, 118, 1296–1304. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485

Rizos, V., Behrens, A., van der Gaast, W., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., Flamos, A., Rinaldi, R., Papadelis, S., Hirschnitz-Garbers, M., & Topi, C. (2016). Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers. Sustainability, 8(11), 1212. https://doi.org/10.3390/su8111212

Robert H. Falk, & David B. McKeever. (2004). Recovering wood for reuse and recycling : a United States perspective. European COST E31 Conference : Management of Recovered Wood Recycling Bioenergy and Other Options : Proceedings, 22-24 April 2004, Thessaloniki. Thessaloniki : University Studio Press, 2004: Pages 29-40.

Rosenau, J. N. (2003, December 2). Globalization and Governance: Bleak Prospects for Sustainability Internationale Politik und Gesellschaft.

SankeyMATIC: Build a Sankey Diagram. (2022). https://sankeymatic.com/build/

Sartori, I., & Hestnes, A. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. Energy and Buildings, 39(3), 249–257.

Sassi, P. (2008). Defining closed-loop material cycle construction. Building Research &Amp; Information, 36(5), 509–519.

Scattola E. (2012). Sostenibilità e sviluppo sostenibile. Evoluzione del concetto. In MPRA - Munich Personal RePEc Archive (No. 37201). Università Ca' Foscari Venezia.

Schultmann, F., & Chini, A. R. (2002). Design for deconstruction and material reuse. Proceedings of the CIB Task Group 39 - Deconstruction Annual Meeting, Karlsruhe 2002. CIB, International Council for Research and Innovation in Building Construction.

SIA. (2015). Nozioni di base per il calcolo energetico degli edifici - SIA 380.

Silvestrini, G. (2019). Che cosa è l'energia rinnovabile oggi. Edizioni Ambiente - Kyoto Club.
SimaPro | LCA software for informed-change makers. (2022, October 21). SimaPro. Retrie-

ved November 5, 2022, from https://simapro.com/

Sirkin, T., & Ten Houtenb, M. (1994). The cascade chain: A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design. Resources, Conservation and Recycling, 10(3).

Skånberg, K., Wijkman, A., & Berglund, M. (2017). The Circular Economy and Benefits for Society: Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency. The Club of Rome.

Smaltimento rifiuti: termovalorizzatori, inceneritori, gassificatori e altri trattamenti termici dei rifiuti. (2019, June 3). Ingenio. Retrieved November 9, 2022, from https://www.ingenio-web.it/articoli/smaltimento-rifiuti-termovalorizzatori-inceneritori-gassificatori-e-altri-trattamenti-termici-dei-rifiuti/

Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions. (2012). Journal of Consumer Policy, 35(1), 23–41.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). (1991). A Techical Framework for Life Cycle Assessment. SETAC Foundation for Environmental Education.

SOLAXESS – White & Color Solar Technology. (2021). https://www.solaxess.ch/

sostenibilità. (2022). Retrieved November 4, 2022, from https://www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita/

Spiazzi, F. (2010). Metodologie per la valutazione della sostenibilità nell'edilizia: analisi comparativa e applicazione all'Ospedale di Prato [Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali]. Università di Padova.

Sung, K., Cooper, T., & Kettley, S. (2014). Individual upcycling practice: exploring the possible determinants of upcycling based on a literature review. Sustainable Innovation.

Sustainability and OSB - Woodguide.org. (2014, November 9). The Upstyle Wood Guide. Retrieved November 9, 2022, from https://www.woodguide.org/guide/osb/

Tancredi, A. M. (2015). Applicazione del BIM per l'analisi LCA : il caso studio Sunslice - Webthesis.

Tapia, C., Bianchi, M., Pallaske, G., & Bassi, A. M. (2021). Towards a territorial definition of a circular economy: exploring the role of territorial factors in closed-loop systems. European Planning Studies, 1–20.

Tasse e altre misure per promuovere l'economia circolare. (2020). Confederazione Svizzera.

TecLab Burgdorf: Startseite. (2020). TecLab. https://teclab.swiss/

The Building System Carbon Framework. (2021). World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). https://www.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment/Decarbonization/Resources/The-Building-System-Carbon-Framework

The Ecology of Building Materials. (2009, February 19). Routledge & CRC Press.

Thinkstep Sphera Company. (2018). EPD for Oriented Strand Board. Norbord.

Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. (2012). In CEN (EN 14081).

Toth Z. & Volt J. (2021). Whole-Life Carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings. In BPIE.

Trerotola, G. (2018, September 4). Entrate in vigore le quattro direttive europee sull'Economia Circolare. Confindustria. https://economiacircolare.confindustria.it/entrate-in-vigore-le-quattro-direttive-europee-sulleconomia-circolare/

Turco, M. L. (2015). Il BIM e la rappresentazione infografica nel processo edilizio. Dieci anni di ricerche e applicazioni. Ediz. italiana e inglese. Aracne.

Umwelt Schweiz 2018. (2018). In Bericht des Bundesrates. Schweizerische Eidgenossenschaf.

UN Environment Document Repository Home. (2022). https://wedocs.unep.org/

University of Reading. (2021). ShowYourStripes. showyourstripes.info. https://showyourstripes.info/s/globe

Van den Berg, M. (2019). Managing Circular Building Projects. Dissertation. University of Twente.

Wagner L.A. (2002). Materials in the economy; material flows, scarcity, and the environment. In Circular 1221. U.S. Geological Survey.

Werner, F., Hofer, P., Taverna, R., & Thürig, E. (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science and Technology, 13, 72–85.

World Bank Climate Change Knowledge Portal. (2020). https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/switzerland

Ximenes, F. A., Cowie, A. L., & Barlaz, M. A. (2018). The decay of engineered wood products and paper excavated from landfills in Australia. Waste Management, 74, 312–322.

Yamaguchi, S. (2018). International Trade and the Transition to a More Resource Efficient and Circular Economy: A Concept Paper. OECD Trade and Environment Working Papers.

Yost, P., & Lund, E. (1997). Residential Construction Waste Management: Builders Field Guide. National Association of Homebuilders Research Center: Upper Marlboro.

Zhuo, C., & Levendis, Y. A. (2013). Upcycling waste plastics into carbon nanomaterials: A review. Journal of Applied Polymer Science, 131(4).