

Monica Lavagna (a cura di)

LCA IN EDILIZIA

**Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia
Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni**



politecnica


MAGGIOLI
EDITORE

La metodologia *Life Cycle Assessment* si sta affermando a livello internazionale come riferimento per valutare l'impatto ambientale di prodotti, processi e servizi. Il suo uso nel settore edilizio, sia alla scala dell'intero edificio sia alla scala dei materiali e prodotti, è particolarmente importante per evitare fenomeni di *greenwashing*, per dimostrare l'efficacia in termini di sostenibilità ambientale di scelte strategiche progettuali o produttive e per orientare le politiche ambientali.

L'Associazione Rete Italiana LCA, ambito in cui nasce questo libro, è stata creata con lo scopo di promuovere l'uso della metodologia LCA e di favorire scambi virtuosi di conoscenze e di esperienze tra studiosi ed esperti a livello nazionale. Questo libro raccoglie i contributi dei partecipanti al Gruppo di Lavoro Edilizia dell'Associazione e restituisce un quadro attuale e variegato di temi, ambiti applicativi e declinazioni metodologiche utili per chi opera nel settore edilizio.

Questo testo è destinato proprio agli operatori del settore edilizio: progettisti, produttori, costruttori, pubbliche amministrazioni, committenti possono trarre utile conoscenza dal quadro che viene delineato e dalle riflessioni critiche che emergono dai vari contributi, acquisendo consapevolezza sulle potenzialità della metodologia LCA. Nondimeno il libro è destinato a chi si occupa di LCA e vuole esplorare le modalità di applicazione e gli ambiti di interesse per il settore edilizio.

Il libro è articolato in quattro parti corrispondenti ad ambiti di interesse e attualità: Decarbonizzazione e stoccaggio di carbonio, Economia circolare, Progettazione *Life Cycle* e Strumenti di valutazione e certificazione ambientale *LCA-based*.

Autori: Francesco Asdrubali, Alessandra Battisti, Corrado Carbonaro, Olga Carcassi, Tecla Caroli, Manuela Crespi, Anna Dalla Valle, Sara Ganassali, Stefania Ganz, Gioia Garavini, Roberto Giordano, Serena Giorgi, Gianluca Grazieschi, Guillaume Habert, Aldo Iacomelli, Giuliana Iannaccone, Monica Lavagna, Adriano Magliocco, Carlotta Mazzola, Alessia Medici, Elena Montacchini, Carol Monticelli, Elisabetta Palumbo, Sandra Persiani, Chiara Piccardi, Francesco Pittau, Francesca Reale, Silvia Tedesco, Francesca Thiebat, Salvatore Viscuso, Alessandra Zanelli, Alessandra Zamagni

Serie **Tecnologia, sostenibilità e Life Cycle Assessment**

La Serie raccoglie studi inerenti al rapporto tra architettura e sostenibilità, con attenzione agli aspetti costruttivi, alle scelte tecniche e all'organizzazione dei processi.

La sostenibilità viene indagata secondo l'approccio al ciclo di vita, concentrando l'interesse sugli aspetti ambientali e i relativi metodi di valutazione, con particolare riferimento al Life Cycle Assessment.

Responsabili scientifici: Andrea Campioli, Monica Lavagna

Comitato Scientifico: Ernesto Antonini, Roberto Bologna, Eliana Cangelli, Maria Cristina Forlani, Roberto Giordano, Maria Teresa Lucarelli, Adriano Magliocco, Massimo Perriccioli, Valeria Tatano, Maria Chiara Torricelli, Fabrizio Tucci

Il presente testo è stato pubblicato nella versione digitale Open Access grazie al contributo dell'Associazione Rete Italiana LCA. La pubblicazione raccoglie i saggi elaborati dai partecipanti A Gruppo di Lavoro Edilizia dell'Associazione Rete Italiana LCA.



Il testo è stato sottoposto al processo di *double blind peer review*.

© Copyright 2022 degli Autori

ISBN 978-88-916-5580-6

DOI 10.30448/UNI.916.55806

<https://doi.org/10.30448/UNI.916.55806>

Open Access Creative Commons license

CC BY-NC-ND 4.0 International Attribution - Non commercial – No Derivative



Pubblicato nel mese di Luglio 2022

Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.

Azienda con sistema qualità certificato ISO 9001:2015

47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8

Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622595

www.maggiolieditore.it

e-mail: clienti.editore@maggioli.it

Monica Lavagna (a cura di)

LCA IN EDILIZIA

**Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia
Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni**

Indice

| | |
|--|-----|
| Presentazione | 7 |
| <i>Maurizio Cellura, Bruno Notarnicola</i> | |
| Prefazione | 9 |
| <i>Monica Lavagna</i> | |
| 0. Introduzione | |
| 0.1 Percorsi di applicazione del Life Cycle Assessment nel settore edilizio | 13 |
| <i>Monica Lavagna</i> | |
| 1. Decarbonizzazione e stoccaggio del carbonio | |
| 1.1 Decarbonizzare il patrimonio edilizio | 27 |
| <i>Francesco Asdrubali, Gianluca Grazieschi</i> | |
| 1.2 Embodied Carbon and Energy. Indicatori per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio | 37 |
| <i>Roberto Giordano</i> | |
| 1.3 Il contributo dei materiali verso la decarbonizzazione del ciclo di vita degli edifici | 49 |
| <i>Chiara Piccardo, Adriano Magliocco</i> | |
| 1.4 Il carbon budget per l'edilizia | 59 |
| <i>Francesco Pittau, Olga Carcassi, Alessia Medici, Giuliana Iannaccone, Guillaume Habert</i> | |
| 2. Economia circolare | |
| 2.1 Life Cycle Assessment come strumento di supporto alle politiche di economia circolare nel settore edilizio | 71 |
| <i>Serena Giorgi</i> | |
| 2.2 Studi LCA per la progettazione e applicazione di Tecnologie Reversibili | 81 |
| <i>Tecla Caroli</i> | |
| 2.3 La circolarità nell'industria: Life Cycle Design per l'innovazione di prodotto e processo | 91 |
| <i>Corrado Carbonaro</i> | |
| 2.4 Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita | 105 |
| <i>Silvia Tedesco, Elena Montacchini</i> | |

3. Progettazione Life Cycle

- 3.1 La progettazione del ciclo di vita in architettura 121
Francesca Thiebat
- 3.2 Informazioni LCA come driver del processo decisionale nelle strutture di
progettazione: creazione di un Life Cycle Database di progetto in ambiente
BIM 131
Anna Dalla Valle
- 3.3 Modello parametrico integrato con LCA: proposta per un approccio
metodologico di valutazione di impatto ambientale di architetture reversibili
temporanee 143
Carol Monticelli, Alessandra Zanelli, Salvatore Viscuso, Cristina Mazzola
- 3.4 Approccio Life Cycle nell'ambito della progettazione e produzione delle
facciate adattive. Sfide, criticità e soluzioni nel settore edilizio italiano 157
Manuela Crespi, Alessandra Battisti, Sandra Persiani

4. Strumenti di valutazione e certificazione ambientale LCA-based

- 4.1 LCA nei Green Building Rating systems DGNB e Level(s) 173
Elisabetta Palumbo
- 4.2 L'importanza di benchmark LCA in Italia per il settore delle costruzioni 191
Sara Ganassali
- 4.3 Le dichiarazioni ambientali di prodotto nel mercato europeo. L'esperienza
dei blocchi cassero in legno cemento 203
Francesca Reale, Gioia Garavini, Alessandra Zamagni
- 4.4 Strumenti LCA e LCC per una edilizia sostenibile misurata 213
Aldo Iacomelli, Stefania Ganz

Presentazione

La Rete Italiana LCA nasce nel 2006 su iniziativa di ENEA al fine di individuare e mettere in relazioni gli studiosi della metodologia *Life Cycle Assessment* presenti in Italia, all'epoca ancora in esiguo numero. L'idea, nata in occasione di una giornata di studi sul metodo LCA, ha portato alla creazione di un *network* per lo scambio di informazioni, metodologie e buone pratiche e per il monitoraggio dello stato dell'arte e delle prospettive di applicazione in Italia. Da allora la Rete Italiana LCA ha ogni anno organizzato un convegno, quale importante momento di confronto dell'evolversi della metodologia e dell'ampliarsi degli ambiti applicativi. Da tali occasioni si è creata una comunità di appassionati specialisti di LCA che hanno dato vita alla rete di relazioni che ancora oggi è viva e in espansione.

Tra le varie iniziative della Rete, sono stati creati dei Gruppi di Lavoro, attivi ancora oggi, rappresentativi dei vari ambiti tematici a cui la valutazione LCA viene applicata: Alimentare e Agroindustriale, Energia e Tecnologie sostenibili, Edilizia, Gestione e Trattamento dei Rifiuti, Prodotti e Processi Chimici, Servizi Turistici, DIRE (*Development and Improvement of LCA methodology: Research and Exchange of experiences*), Social LCA.

Un momento di importante evoluzione della Rete è avvenuto nel 2012, quando si è costituita l'Associazione Rete Italiana LCA, grazie alla crescita della Rete per il costante impegno di quelli che poi sono diventati i soci fondatori, appartenenti a enti di ricerca (ENEA) e Università (Università degli studi di Bari, Politecnico di Milano, Università degli studi di Palermo, Università degli studi di Padova, Università di Chieti e Pescara, Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Reattività Chimica e la Catalisi). Da attività basate sull'entusiastico contributo spontaneo di un gruppo di persone, si è passati a una struttura organizzata, con un Consiglio Direttivo, dei delegati alle principali attività della Rete, un impegno costante nella gestione delle attività.

I partecipanti alla Associazione sono negli anni cresciuti, anche per la continua espansione e sviluppo della metodologia in tutti i settori. L'Associazione si pone come punto di riferimento scientifico a livello nazionale, operando con rigore metodologico e favorendo la crescita della conoscenza, anche tramite le attività di formazione che annualmente vengono organizzate.

Tra i compiti di informazione e divulgazione, i Gruppi di Lavoro si sono impegnati nel corso degli anni nella produzione di pubblicazioni che raccogliessero il contributo dei partecipanti, a testimonianza delle qualificate iniziative presenti a livello nazionale.

Anche il Gruppo di Lavoro Edilizia presenta in questo testo un'articolata raccolta di studi, ricerche, riflessioni metodologiche, frutto delle esperienze che i vari gruppi di ricerca hanno sviluppato nel corso degli anni. Un contributo prezioso a supporto di quel percorso di raccolta e condivisione delle esperienze che fa crescere la comunità scientifica e che è nello spirito dell'Associazione.

L'Associazione Rete Italiana LCA garantisce un continuo aggiornamento delle sue attività e iniziative tramite il sito e i propri canali *social* su LinkedIn e Facebook, strumenti attraverso i quali chi è interessato a unirsi alla rete può trovare informazioni e partecipare attivamente.

Maurizio Cellura

Presidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2015-2019 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore ordinario di Fisica tecnica ambientale, presso l'Università degli studi di Palermo.

Email: maurizio.cellura@unipa.dream.it

Bruno Notarnicola

Presidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2019-2023 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore ordinario di Scienze merceologiche, presso l'Università degli studi di Bari Aldo Moro.

Email: bruno.notarnicola@uniba.it

Prefazione

Il presente libro raccoglie i contributi di alcuni tra i partecipanti più attivi al Gruppo di Lavoro Edilizia della Associazione Rete Italiana LCA. I Gruppi di Lavoro hanno l'obiettivo di creare un *network* nazionale di studiosi che applicano la metodologia LCA in uno specifico ambito o settore. Questo porta a relazioni particolari interdisciplinari e transdisciplinari e a percorsi differenziati di specializzazione: molti ricercatori che operano nel settore edilizio si sono interessati alla metodologia LCA per applicare una procedura di valutazione rigorosa della sostenibilità a sostegno delle scelte progettuali (questo è stato anche il percorso mio e della maggior parte delle persone che partecipano al gruppo di lavoro e hanno contribuito al presente libro); molti ricercatori esperti di LCA (con formazione nelle scienze ambientali, ingegneria ambientale, ecc.) hanno dedicato attenzione alle applicazioni in particolare nel settore edilizio. Questo differente modo di affrontare gli studi LCA in edilizia porta anche a una ricchezza di approcci e punti di vista.

Il fatto che la maggior parte dei contributi presentati in questo testo sia di studiosi che dal settore edilizio si sono dedicati a specializzarsi nella metodologia LCA rivela la forte esigenza di esplorare procedure scientifiche per affrontare i temi della sostenibilità in edilizia, e permette anche di testimoniare la varietà di applicazioni possibili che la metodologia LCA può avere. Infatti ogni ricercatore, a partire da una profonda conoscenza del settore edilizio e applicando la metodologia nello specifico ambito di interesse e studio, ha esplorato modalità peculiari, portando grazie alla sua esperienza un contributo originale all'avanzamento delle conoscenze e all'ampliamento delle potenzialità applicative della metodologia LCA.

Il libro restituisce dunque questa ricchezza di punti di vista, di percorsi metodologici, di esplorazioni applicative. Ne deriva un quadro articolato e complesso, rappresentativo di alcuni dei principali temi trainanti oggi, proprio perché i singoli contributi restituiscono percorsi di ricerca avanzata. Ne emerge anche una varietà di scale applicative, dall'edificio, al sistema costruttivo, al singolo prodotto/materiale.

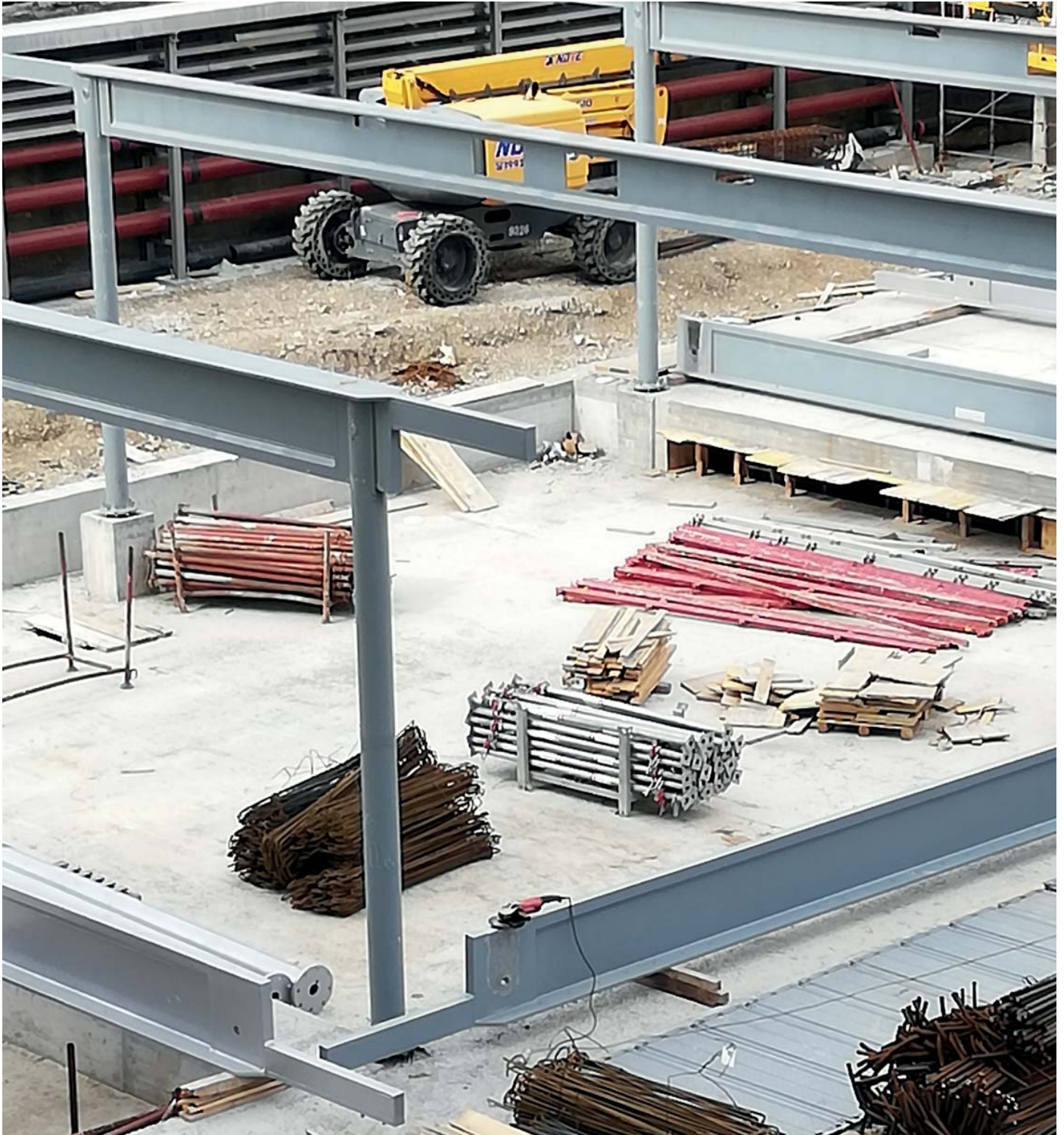
Per cercare di dare un ordine ai contributi sono stati individuati 4 capitoli: i primi due raccolgono i contributi che si concentrano attorno a due temi fortemente trainati dalle attuali politiche europee, ossia la decarbonizzazione e l'economia circolare; il terzo capitolo raccoglie i contributi relativi all'applicazione della metodologia LCA nel progetto di architettura; il quarto capitolo approfondisce alcuni strumenti di valutazione e di certificazione basati sulla metodologia LCA e applicati in specifico nel settore edilizio.

Va sottolineato che la ricchezza del libro consiste anche nella varietà dei punti di vista e dunque anche nel possibile diverso contributo critico inerente il medesimo tema che può trasparire dai diversi saggi qui raccolti. Anche il tipo di contributi si presenta alquanto variegato, da contributi di carattere più teorico, che tratteggiano lo stato dell'arte, a contributi più specifici di carattere applicativo, che illustrano esempi e casi studio con lo scopo comunque di desumerne considerazioni di carattere generale. Anche questo costituisce la ricchezza del testo, creando un quadro ben documentato e completo, ricco di spunti di riflessione.

Monica Lavagna

Coordinatore del GdL Edilizia della Associazione Rete Italiana LCA dal 2008 e curatore del presente libro. VicePresidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2019-2023 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e Ingegneria delle costruzioni (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team. Email: monica.lavagna@polimi.it

0. Introduzione



0.1 Percorsi di applicazione del Life Cycle Assessment nel settore edilizio

Il *Life Cycle Assessment* (LCA) è una metodologia di valutazione degli impatti ambientali che sta avendo sempre più applicazione nel settore edilizio, in diversi ambiti, a diverse scale e coinvolgendo diversi operatori del processo edilizio.

La metodologia LCA quantifica tutte le risorse consumate in ingresso (materie prime, energia, acqua) e tutte le sostanze inquinanti emesse in uscita (emissioni in aria, acqua, terreno, rifiuti solidi) dal sistema in analisi, che può essere correlato a un prodotto fisico, a un processo o a un servizio. Una valutazione LCA completa considera tutte le attività che si rendono necessarie nelle varie fasi dell'intero ciclo di vita (estrazione materie prime-produzione-transporto-costruzione-uso-manutenzione-fine vita). La peculiarità di questa metodologia è dunque quella di cercare di effettuare un'analisi il più completa possibile, considerando tutte le fasi del ciclo di vita e un numero esteso di indicatori ambientali, al fine di evitare fenomeni di *burden shifting*, ossia di spostamento degli impatti da una fase all'altra del ciclo di vita o da un impatto ambientale a un altro. Peraltro la metodologia LCA si colloca all'interno del più ampio approccio al ciclo di vita, *Life Cycle Thinking*, che considera le tre dimensioni della sostenibilità (ambientale, economica e sociale) come strettamente interrelate.

Nel settore edilizio, la metodologia LCA può essere applicata sia alla scala dell'intero edificio sia alla scala del sistema costruttivo sia alla scala del prodotto edilizio (Lavagna, 2008). Sono in atto percorsi di applicazione anche a scale più ampie, come quella urbana e territoriale (Lavagna et al., 2014), ma si tratta ancora di applicazioni meno consolidate e dunque non affrontate in questo testo.

Operatori diversi hanno responsabilità diverse su tali livelli applicativi: il produttore di componenti edilizi può agire sulle fasi di reperimento delle materie prime (o da riciclo), sul processo produttivo, sulla durabilità e necessità di processi di manutenzione e sulle potenzialità di riciclabilità a fine vita; il progettista e il costruttore possono agire sul contenimento degli impatti legati alla scelta dei materiali (a minor impatto), alla scelta del fornitore (locale), alla fase di uso, alla manutenibilità e adattabilità nel tempo e alla reversibilità costruttiva a fine vita. Dopo una fase iniziale di applicazione "volontaria" della metodologia, che ha visto prevalere gli studi in ambito accademico, ma con poche ripercussioni sulla realtà di mercato, stiamo oggi assistendo a una progressiva applicazione estesa della metodologia nella prassi, promossa da strumenti normativi o incentivanti, che inducono gli operatori del settore edilizio ad applicare il metodo LCA (Campioli, Lavagna, 2013).

Possiamo quindi affermare che il ruolo delle politiche e degli strumenti normativi o incentivanti è fondamentale per promuovere un uso diffuso della metodologia, utile peraltro a garantire la verifica che le politiche spingano nella direzione di una effettiva riduzione degli impatti ambientali nell'intero ciclo di vita. Le politiche ambientali spesso affrontano però i temi ambientali separatamente mentre occorre una visione di insieme. Da qui l'importanza di applicare la valutazione LCA nelle *policy* e a supporto della definizione delle azioni di miglioramento ambientale che ne conseguono.

Monica Lavagna

Coordinatore del GdL Edilizia della Associazione Rete Italiana LCA dal 2008 e curatore del presente libro. VicePresidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2019-2023 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e Ingegneria delle costruzioni (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team. Email: monica.lavagna@polimi.it

0.1.1 Life Cycle Assessment nelle policy

Un ambito di applicazione della metodologia LCA ancora poco esplorato, ma in corso di definizione e oggetto di sempre maggiore interesse da parte delle Pubbliche Amministrazioni, è quello delle *policy* (Lavagna, Campioli, 2022). Per *policy* si intendono gli orientamenti strategici o le linee di azione sottese alla produzione sia di documenti di indirizzo e di programmi pluriennali di azione, sia di direttive (europee) e normative cogenti (nazionali), fino ai regolamenti edilizi e agli strumenti di pianificazione del territorio a livello locale.

La modalità di applicazione si gioca in questo caso su due livelli: da un lato la metodologia LCA può essere uno strumento di definizione delle *policy* e verifica degli effetti (applicata dai *policy makers*), dall'altro la metodologia LCA può essere proprio integrata nelle *policy* come obiettivo di riduzione degli impatti (richiedendo dunque agli operatori finali di dimostrare una riduzione degli impatti ambientali)¹.

Per esempio nel caso delle *policy* sull'efficienza energetica degli edifici, è possibile applicare la valutazione LCA per comprendere l'efficacia delle *policy* rispetto agli obiettivi di riduzione degli impatti, tramite la modellizzazione dell'intero patrimonio edilizio² e la modellizzazione degli effetti delle direttive, oppure inserire all'interno di strumenti di *policy* richieste di verifica degli impatti nell'intero ciclo di vita, come avviene per esempio nelle certificazioni energetiche degli edifici della Svizzera (la certificazione Minergie richiede la verifica dell'energia incorporata e il rispetto di un limite massimo per tale valore di 50 kWh/m²a) e della provincia di Bolzano (la certificazione CasaClima Nature richiede una verifica degli impatti LCA delle soluzioni di involucro e impiantistiche, considerando tre indicatori di impatto, l'Energia Primaria PEI, il Surriscaldamento globale GWP e l'Acidificazione AP).

Gli aspetti critici per l'affermazione di questo percorso sono da un lato la preparazione dei funzionari delle Pubbliche Amministrazioni sia nell'applicare la metodologia LCA a sostegno della definizione delle *policy* sia nel verificare l'applicazione qualora la metodologia LCA venga richiesta dalle *policy*, dall'altro la preparazione da parte degli operatori del mercato a far fronte alle richieste normative. Questo implica la necessità di trovare livelli di semplificazione nell'applicazione della metodologia, che spesso si traducono in una riduzione degli indicatori ambientali considerati (per rendere più semplice la lettura dei risultati e il confronto tra opzioni alternative) o in una semplificazione della valutazione LCA (appoggiandosi a dati secondari da *software* e banche dati oppure riducendo le fasi del ciclo di vita considerate). Le semplificazioni, seppur importanti in questa fase iniziale al fine di diffondere l'uso della metodologia LCA, sono sempre rischiose, perché possono portare a risultati non corrispondenti alla realtà. La necessità di estendere la preparazione degli operatori è fondamentale, anche per non banalizzare la modalità con cui viene applicata la metodologia.

Un ulteriore elemento di grande importanza in applicazioni di carattere normativo o di competizione per l'accesso ad appalti pubblici (come nel caso del GPP) è l'armonizzazione della metodologia (assunzioni nello studio LCA) e dei dati di partenza (univocità della banca dati LCA di riferimento). Molte nazioni europee hanno messo a punto strumenti che consentono un'applicazione secondo procedure standardizzate (es. Minergie in Svizzera), strumenti di calcolo standardizzati (es. Totem in Olanda) e l'accesso a banche dati nazionali controllate da enti ministeriali o supervisionati da enti ministeriali.

In Italia ci sono delle iniziative locali, come quella della provincia di Bolzano (CasaClima Nature), ed è in atto un percorso attivato dal Ministero dell'Ambiente tramite i CAM nel GPP, che nella nuova versione introducono la metodologia LCA nei criteri premianti, sia in fase di

¹ Una interessante esperienza in corso in Italia è il progetto Interreg *LCA for Regions*, di cui Regione Lombardia è *partner* e in cui l'Associazione Rete Italiana LCA e il Politecnico di Milano sono coinvolti come *stakeholders*. L'obiettivo è proprio l'applicazione della metodologia LCA nelle *policy*, ed è in atto un confronto tra varie regioni europee sulle modalità di tale applicazione. All'interno di questo progetto si stanno considerando entrambe le modalità di applicazione.

² Un esempio di tale applicazione è la ricerca *EU Carbon Footprint. Basket of Product indicator on Housing* (Baldassarri et al., 2017) del Joint Research Center, il cui obiettivo è definire l'impatto complessivo del patrimonio residenziale europeo e modellizzare scenari di cambiamento in relazione alle possibili *policy*. Documento disponibile al link: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107958>

Si veda anche il lavoro preparatorio di elaborazione di dati statistici e di costruzione dei modelli rappresentativi (Lavagna et al., 2016) e la valutazione LCA dei modelli rappresentativi (Lavagna et al., 2018).

progettazione sia in fase di costruzione. L'ENEA sta coordinando la realizzazione di una banca dati italiana LCA (progetto Arcadia³), che possa sostenere questo percorso, ma la costruzione di un numero significativo di *dataset*⁴ che consentano lo sviluppo di una LCA di edificio è un percorso lungo e che richiede aggiornamento costante.

Parallelamente, una buona fonte di dati LCA contestualizzati, molto più significativa del dato da banca dati, proviene dalle certificazioni ambientali di prodotto (EPD- *Environmental Product Declaration*). La loro diffusione mette in campo una quantità significativa di dati e permette una correlazione più stretta tra prodotto effettivamente usato nell'edificio e corrispondente dato ambientale (a questo punto primario). La banca dati può quindi essere un supporto utile in fase di *screening* preliminare e confronto tra materiali alternativi (fornendo un dato medio di settore), ma la certificazione EPD è fondamentale per la scelta di prodotti specifici a basso impatto ambientale. Va infatti considerato che in un confronto LCA tra materiali alternativi, il dato medio di settore può risultare fuorviante nell'operare una scelta, perché potrebbe indicare che il materiale A è a minor impatto rispetto al materiale B, ma poi può esistere un prodotto specifico nella categoria materica B con un impatto minore rispetto a un altro prodotto specifico della categoria A, con un ribaltamento del risultato comparativo; per cui i confronti andrebbero operati rispetto a prodotti specifici reperibili sul mercato (locale). Le certificazioni ambientali EPD coprono solo una parte della valutazione ambientale, quella relativa al prodotto, ma rimangono ancora scoperte molte informazioni importanti relative agli impatti della fase d'uso (tipicamente attinti da banca dati, in relazione al vettore energetico utilizzato) e alle fasi di costruzione e fine vita (rispetto alle quali esistono ancora pochi studi e approfondimenti, in quanto considerate fasi poco rilevanti).

Anche su questi aspetti, il ruolo delle istituzioni nel promuovere la costruzione di banche dati e strumenti di elaborazione dei dati ambientali qualificati, la qualificazione degli esperti operanti in questo ambito, l'armonizzazione di procedure e modalità applicative, risulta essenziale per una diffusione della metodologia LCA che ne garantisca credibilità dei risultati e accuratezza di applicazione.

0.1.2 Life Cycle Assessment, efficienza energetica e decarbonizzazione

Uno degli ambiti di maggiore applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* nel settore edilizio negli ultimi 20 anni è sicuramente associato al calcolo del bilancio energetico nel ciclo di vita (*Life Cycle Energy Assessment*, LCEA), considerando non solo l'energia operativa (*operational energy*, OE), come richiesto dalle normative, ma anche l'energia incorporata (*embodied energy*, EE). L'energia operativa incide tuttora, negli edifici del patrimonio costruito prima delle direttive europee sull'efficienza energetica degli edifici (2006 e 2010), per più del 90% degli impatti complessivi (Lavagna et al., 2018), ma proprio con l'introduzione delle nuove direttive europee e l'affermarsi di modelli come le *Passivhaus* e poi gli *Zero Energy Buildings*, ha cominciato a emergere la preoccupazione che a una riduzione dei consumi energetici della fase d'uso potesse corrispondere un innalzamento degli impatti correlati all'uso intenso di materiali (elevati spessori di isolanti, tripli vetri nei serramenti, canalizzazioni per la VMC, ecc.) e impianti (fotovoltaici, geotermici, solari, ecc.) per la realizzazione di edifici super-performanti (Lavagna et al., 2012).

Vari studi hanno messo in evidenza come l'incremento dello spessore di isolamento termico dell'involucro oltre un certo limite possa creare criticità nel bilancio complessivo, comportando un innalzamento degli impatti incorporati non compensato dai benefici della fase d'uso: in

³ Il progetto Arcadia, iniziato a settembre 2019, sviluppato e coordinato da ENEA, intende favorire l'approccio di ciclo di vita negli appalti pubblici e acquisti verdi e rafforzare le competenze delle Pubbliche Amministrazioni in quest'ambito. In particolare il progetto ha come obiettivo la realizzazione di una banca dati italiana LCA relativa a filiere nazionali quale strumento di supporto alle PA nella preparazione dei bandi di acquisto e nella valutazione delle offerte e come fonte di dati rappresentativi del contesto italiano. Il progetto è finanziato dal programma PON, Programma Operativo Nazionale Governance e Capacità Istituzionale 2014-2020, che è uno degli strumenti della politica di coesione finanziati dall'Unione europea attraverso i Fondi Strutturali e di Investimento Europei - Fondi SIE.

⁴L'Unità di ricerca LifeCycle Team del Dipartimento ABC del Politecnico di Milano ha collaborato alla realizzazione di alcuni *dataset* sia della banca dati CasaClima sia della banca dati Arcadia. In particolare per il progetto Arcadia si sta occupando della filiera vetro e telai in PVC per i serramenti.

Italia superare i 15 cm di isolamento termico per ottenere trasmittanze inferiori a $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ per arrivare a uno standard *passivhaus* non è compensato dalla riduzione di una decina di $\text{kWh/m}^2\text{a}$ della fase d'uso, per cui risulta sufficiente progettare un *low energy building* con $25 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ senza necessariamente arrivare a $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ di consumi correlati al riscaldamento invernale (Lavagna, 2005). Senza contare che in periodo estivo involucri troppo isolati creano surriscaldamento interno e innalzamento dei consumi per il raffrescamento o discomfort⁵.

Va ricordato che nell'energia incorporata non va considerata solo l'energia iniziale, di produzione e costruzione, ma anche l'energia richiesta dai processi di manutenzione e sostituzione (per esempio tipicamente isolanti e pannelli fotovoltaici richiedono sostituzioni ogni 25 anni). Questi processi innalzano l'energia incorporata nell'arco del ciclo di vita.

Negli studi LCA è stato evidenziato come i nuovi edifici ad altissima efficienza energetica NZEB possano avere una *embodied energy* maggiore dell'*operational energy*, e quindi risulta determinante poter fare un bilancio costi-benefici non solo economici ma anche ambientali (Lavagna et al., 2012; Paleari et al., 2016; Lavagna, 2017).

Occorre sottolineare che questi studi basati su valutazioni LCA, ormai ampiamente diffusi nella letteratura scientifica, non hanno però influito sulle attuali norme, che spingono il mercato alla ricerca della massima efficienza della fase d'uso senza una verifica del bilancio nel ciclo di vita (se non di tipo economico, nella valutazione *cost-optimal*).

Dall'attenzione all'energia si è poi recentemente passati a una sempre più preponderante attenzione al tema della decarbonizzazione (che peraltro è stato il motore anche delle direttive sull'efficienza energetica degli edifici, ai fini del rispetto del Protocollo di Kyoto, accompagnato anche dai problemi geopolitici di approvvigionamento dei combustibili fossili al di fuori dall'Europa). Si tratta di due indicatori strettamente legati, ma con diverse implicazioni. Il tema della decarbonizzazione esteso all'intero ciclo di vita ha portato a ricercare prodotti edilizi a basso impatto di carbonio. Dal momento che il legno e i materiali di origine vegetale assorbono CO_2 durante la crescita della pianta, stiamo assistendo a un intenso interesse e promozione di questi materiali, che garantirebbero lo stoccaggio del carbonio e dunque addirittura un impatto negativo (in termini di CO_2). Su questo tema però va posta la stessa attenzione critica che è stata pocanzi sollevata in relazione al tema dell'efficienza energetica in fase d'uso. Ogni massimizzazione legata a un solo indicatore di impatto, sia esso il consumo di energia o la riduzione delle emissioni di CO_2 , può causare "slittamento degli impatti" (*burden shifting*) da un indicatore di impatto ambientale a un altro (per esempio, dal *Global Warming Potential* all'Energia primaria), così come ogni massimizzazione legata a una sola fase del ciclo di vita può creare spostamento degli impatti da una fase a un'altra (dall'operativa all'incorporata). Le valutazioni LCA dovrebbero dunque sempre prevedere almeno due indicatori per una verifica degli andamenti degli impatti (Invidiata et al., 2018).

Le ambiguità di questa importanza attribuita allo stoccaggio del carbonio nei materiali di origine vegetale va ridimensionato proprio applicando correttamente la valutazione LCA, che impone di non guardare solo alle fasi iniziali del ciclo di vita (stoccaggio durante la crescita della pianta che in genere compensa gli impatti di produzione, generando dunque valori di impatto negativi, ossia inferiori allo zero, per la filiera vegetale), ma di considerare tutto il ciclo di vita e dunque anche il fine vita, dove gli scenari di recupero energetico tramite incenerimento o anche solo di riciclo, determinano il rilascio della CO_2 stoccata, portando dunque il bilancio di carbonio nell'intero ciclo di vita a zero. Andrebbe anche messo metodologicamente in dubbio questo utilizzo di valori negativi di impatto, che fanno sembrare che tagliare gli alberi sia un beneficio ambientale. L'eccessiva enfasi nei confronti dello stoccaggio del carbonio nei materiali di origine vegetale può portare a favorire applicazioni distorsive dove

⁵ Alle nostre latitudini, in clima mediterraneo, sarebbe importante che valutazioni ambientali volte a individuare la soluzione ottimale di involucro considerino oltre al ruolo dell'isolamento termico anche il ruolo dell'inerzia termica (Lavagna et al., 2011). Chiaramente soluzioni dotate di inerzia termica sono più impattanti di soluzioni leggere, con minore intensità materica, ma l'inerzia termica svolge un ruolo essenziale nel garantire condizioni di comfort termico e dunque va verificato che l'involucro garantisca anche tale prestazione.

viene usato molto legno (es. Xlam anziché sistemi in legno puntiformi), poiché più legno utilizzo più vantaggio in termini di riduzione della CO₂ nel bilancio della *carbon footprint* di edificio ottengo, non tenendo in considerazione il maggior consumo di materiale e dunque il maggior impatto generato in altri indicatori di impatto (Lavagna et al., 2022).

Rispetto a questi percorsi, l'applicazione di valutazioni LCA che si estendano all'intero ciclo di vita (mettendo a bilancio anche il rilascio a fine vita), e che considerino anche altri indicatori di impatto oltre al *Global Warming Potential* (CO₂ eq.) permette di evitare eventuali distorsioni derivanti da politiche focalizzate su singoli obiettivi ambientali.

0.1.3 Life Cycle Assessment ed economia circolare

Un altro importante ambito di applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* nel settore edilizio che si sta affermando negli ultimi anni è quello legato al consumo di risorse, principalmente materiche. Considerando infatti che ormai da decenni sono state definite e messe in atto (anche tramite normative cogenti) le strategie per la riduzione dei consumi di energia, adesso l'attenzione si sta focalizzando sul problema del consumo delle materie prime. I principi dell'economia circolare, che mirano a chiudere il cerchio nell'uso delle risorse, appaiono assolutamente in linea con l'esigenza di uso efficiente delle risorse e con l'approccio *life cycle*. Inizialmente l'economia circolare è stata maggiormente applicata nelle *policy* correlandola al problema della gestione dei rifiuti e al fine vita, ma, in realtà, attraverso le strategie del riciclo e riuso si mira a identificare una potenziale nuova fonte di risorse in termini di materie prime seconde, tanto da parlare di *urban mining*, ossia di miniere di risorse materiche stoccate nelle città.

Sembrirebbe che questi principi siano coerenti con la sostenibilità, ma il rischio è che si cerchi solo una via alternativa per continuare ad alimentare il consumismo e la riduzione dei cicli di vita dei beni, rendendolo tollerabile grazie al riciclo. Un grande rischio della circolarità infatti è di favorire l'accelerazione dei cicli di consumo e dunque abbreviare la vita dei prodotti, al fine di garantire all'economia la continuità dei processi di produzione e rilavorazione. Non sempre vengono messi in campo i principi originari dell'economia circolare, così come formulati negli anni Sessanta da Walter Stahel, orientati all'estensione della vita dei prodotti e alla definizione di nuovi modelli di *business* basati sui prodotti-servizio; spesso l'economia circolare viene banalmente interpretata come riciclo dei rifiuti e strategie per risolvere il problema dei rifiuti, invece di avere una più ampia visione sull'uso efficiente delle risorse.

Dunque, in realtà non è detto che i principi di circolarità siano sempre ambientalmente sostenibili, e anche in quest'ambito, come in quello relativo all'efficienza energetica, la verifica LCA può essere importante per evitare distorsioni, ma nella prassi è raramente applicata (Giorgi et al., 2020; Giorgi et al., 2022). Per esempio, ci sono casi di impatto maggiore nei prodotti riciclati rispetto a prodotti da materie prime vergini, a causa dei processi impattanti di riciclaggio, come nel caso degli inerti riciclati (Lavagna et al., 2022).

Le premialità inerenti l'uso di materiali riciclati, spesso presenti nei criteri dei *Green Building Rating Systems* o nei Criteri Ambientali Minimi del *Green Public Procurement*, rischiano di essere troppo generici (la premialità deriva dalla percentuale in base al peso e non distingue tra tipi di materiali, che hanno invece differenti impatti ambientali in termini di vantaggi/svantaggi derivanti dal riciclo) e quasi "impongono" di orientare le scelte di progetto nella direzione del riciclo creando peraltro competizione con altre scelte materiche, orientate per esempio all'uso di materiali rinnovabili e *bio-based*, che permettono lo stoccaggio del

carbonio (creando il problema se sia meglio scegliere un prodotto riciclato o un prodotto rinnovabile a base legno). La scelta dei materiali con cui costruire l'edificio dovrebbe essere ponderata a seconda della singola situazione e la scelta di soluzioni costruttive a ridotto impatto ambientale dovrebbe basarsi su valutazioni LCA contestualizzate.

Di nuovo l'approccio *single-issue*, dove si concentra l'attenzione su un singolo obiettivo ambientale (riduzione del consumo di energia oppure decarbonizzazione oppure circolarità/ contenuto di riciclato) non consente una valutazione sistemica degli effetti ambientali (Lavagna et al., 2021). Anche rispetto all'obiettivo dell'uso di materiali locali, una valutazione LCA potrebbe rivelare che un prodotto non-locale ma con minori impatti nel processo di produzione sia migliore, nel ciclo di vita, di un prodotto locale più impattante nella fase di produzione.

Si sottolinea inoltre che nel settore edilizio spesso le strategie si soffermano sull'uso di materiali riciclati e sulla circolarità delle risorse legate ai prodotti, mentre sono meno esplorati i temi che coinvolgono la scala dei sistemi costruttivi, per esempio valutando il ruolo della disassemblabilità (Brambilla et al., 2019), e dell'edificio nel suo insieme, per esempio valutando il ruolo dell'adattabilità nel tempo (Lavagna et al., 2020).

0.1.4 Life Cycle Assessment nel progetto di architettura

L'uso della valutazione LCA nel progetto di architettura è un obiettivo ancora ambizioso, ma sempre più praticato. Inizialmente la valutazione LCA era applicata in ambito accademico e come valutazione *ex-post*, di verifica dei risultati, oppure "teorica", tra alternative costruttive e tra prodotti alternativi. Il supporto alle scelte progettuali era dunque indiretto: dagli studi risultavano possibili indicazioni che avrebbero potuto orientare i progettisti. La carenza di informazioni specifiche sui singoli prodotti imponeva l'uso di banche dati e dunque l'ottenimento di risultati generici di orientamento.

La situazione attuale vede una proliferazione di strumenti (*tool* e *software* per l'elaborazione dei calcoli, banche dati e certificazioni per l'accesso ai dati ambientali) che consentono una maggiore contestualizzazione delle valutazioni LCA (dati LCI nazionali/regionali, certificazioni ambientali EPD specifiche per ogni prodotto). Questa accessibilità a strumenti e dati permette ai progettisti un rapporto più diretto e la possibilità di elaborare valutazioni specifiche sul proprio progetto, autonomamente o tramite la presenza di un consulente ambientale nei casi di progetti complessi (Campioli et al., 2020). In questo modo l'applicazione della valutazione LCA arriva al suo scopo effettivo, ossia quello di orientare le scelte durante il progetto (Lavagna et al., 2019).

Non sono solo gli strumenti propriamente appartenenti al mondo LCA ad essersi evoluti in tal senso, ma anche gli strumenti appartenenti al mondo della progettazione, come il *Building Information Modeling* (BIM) che permette livelli sempre maggiori di interazione tra dati e di integrazione nelle informazioni di progetto anche di aspetti ambientali.

Ovviamente tra le applicazioni del metodo LCA in ambito accademico e le applicazioni in ambito pratico ci sono sostanziali differenze, legate al livello di approfondimento della valutazione (Dalla Valle et al., 2021).

Un aspetto che rimane critico in questo momento di "transizione" da un uso dell'LCA da parte degli specialisti a un uso diffuso anche tra non esperti è l'effettiva capacità di gestione delle informazioni ambientali e di elaborazione delle valutazioni da parte di questi ultimi. La diffusione di strumenti semplificati e *user friendly* che facilitano l'uso anche a non esperti

rischia di far sembrare semplice la valutazione, che però richiede competenze e conoscenze per una corretta applicazione. Come avvenuto anche per la valutazione energetica degli edifici, dove i *software* hanno facilitato la possibilità di elaborare bilanci e modellazioni del comportamento energetico dell'edificio, ma con la necessità di acquisire competenze per una corretta elaborazione, così per le valutazioni LCA non basta affidarsi allo strumento ma occorre acquisire le competenze per svolgere la valutazione. Oltretutto le competenze richieste in ambito edilizio sono particolari, soprattutto quando l'oggetto della valutazione non è il prodotto edilizio (assimilabile a un prodotto industriale) ma è l'edificio, che richiede una sensibilità e competenza specifica di settore. Infatti, normalmente i consulenti ed esperti LCA svolgono valutazioni applicate anche a settori diversi (industriale, agro-alimentare, chimico, ecc.), mentre l'applicazione della valutazione LCA all'edificio richiede una conoscenza di settore perché coinvolge vari aspetti (produttivi, costruttivi, energetici, manutentivi, di filiera, ecc.) e anche una molteplicità di operatori presso cui raccogliere informazioni. Proprio per le peculiarità del settore e degli oggetti di studio, il settore edilizio è l'unico per il quale sono stati sviluppati standard e procedure metodologiche specifiche, software dedicati, ecc. Queste specificità richiederebbero anche lo sviluppo di informazioni su aspetti ancora poco monitorati. Le banche dati contengono informazioni relative ai materiali e ai consumi di energia, mentre mancano molti processi tipici del settore edilizio e i cui dati sono difficilmente raccogliibili e monitorabili: la fase di costruzione in cantiere, le fasi di manutenzione, la fase di demolizione o decostruzione. Finora tali attività sono state considerate trascurabili, a fronte della rilevanza degli impatti della fase d'uso e della fase di produzione. Ma la conoscenza degli impatti di cantiere può essere importante in una valutazione che per esempio compara soluzioni costruttive convenzionali (realizzate in opera) e soluzioni costruttive prefabbricate. Anche tutto il versante dei processi di manutenzione (compresa la conoscenza della durata dei componenti e dei cicli di sostituzione) è un versante quanto mai rilevante (Lavagna, 2010; Lavagna, 2012) in una valutazione LCA di edificio, ma rispetto a cui mancano informazioni attendibili. Persino il decadimento prestazionale può essere un elemento influente nella valutazione LCA, soprattutto in relazione alla prestazione termica e ai risparmi in fase d'uso (Litti et al., 2018).

In questa direzione, strumenti come il BIM che facilitano l'interazione tra gli operatori e la collezione delle informazioni lungo il ciclo di vita potrebbero diventare un importante mezzo di raccolta dati, andando nel corso del tempo a coprire anche informazioni al momento mancanti (Dalla Valle et al., 2020).

0.1.5 Life Cycle Assessment e strumenti di supporto

Gli strumenti sono fondamentali per rendere applicabile la metodologia nella prassi corrente. Per strumenti intendiamo i protocolli e le linee guida che descrivono la procedura metodologica standardizzata (con maggior livello di dettaglio rispetto alle norme tecniche), le procedure di certificazione ambientale di edificio e di prodotto che consentono la comparabilità sul mercato e l'identificazione delle soluzioni migliori, le fonti dei dati (banche dati), gli strumenti di calcolo (*tool* e *software*), i valori di riferimento (*benchmark* e *target*) rispetto ai quali effettuare un confronto dei risultati ottenuti dalla valutazione LCA (soprattutto di edificio).

Pur essendo una metodologia ampiamente codificata e standardizzata in ambito ISO⁶ e pur avendo un ampio ventaglio di norme tecniche specificamente dedicate al settore edilizio sia

⁶ ISO 14040:2006. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework*
ISO 14044:2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines*

in ambito ISO⁷ sia in ambito CEN⁸, permangono notevoli elementi discrezionali durante lo svolgimento dello studio LCA che tendono a rendere difficilmente comparabili studi eseguiti da soggetti diversi, soprattutto alla scala di edificio. Per questo esistono molteplici specifiche metodologiche declinate in ambiti diversi nel tentativo di definire delle assunzioni comuni che rendano paragonabili i risultati. Nell'ambito delle norme tecniche di prodotto, le regole sono state più chiaramente sviluppate grazie alle PCR-*Product Category Rules* (specifiche per categoria di prodotto) e grazie anche alle indicazioni della PEF-*Product Environmental Footprint*, percorso sviluppato dalla Commissione Europea proprio per cercare di garantire una comparabilità tra prodotti sul mercato e la definizione di *benchmark* e *target* onde stimolare la competitività sui temi ambientali. Nell'ambito della valutazione LCA di edificio esistono linee guida declinate da diversi strumenti (es. all'interno dei *Green Building Rating Systems*), volte anche in questo caso a garantire la comparabilità dei risultati e il confronto con *benchmark* o *reference buildings (Business As Usual)*. Si pensi alle istruzioni SIA 2032 per il calcolo dell' "Energia grigia negli edifici" legate alla certificazione energetica Minergie in Svizzera o alle linee guida per il *Whole life carbon assessment for the built environment* nell'ambito del Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) professional standards and guidance del Regno Unito. Tutte queste declinazioni portano ad assunzioni molto diverse e a declinazioni della metodologia che cambiano in relazione al contesto di applicazione e allo strumento utilizzato.

Per poter leggere il risultato di una LCA e comprendere se i valori sono alti o bassi in relazione all'oggetto considerato occorre avere dei valori di confronto. La valutazione LCA si applica in genere per scopi comparativi tra alternative, a parità di prestazione. In questo caso dunque il confronto è interno alla valutazione stessa. Per esempio tra isolanti alternativi a parità di trasmittanza oppure tra soluzione pre-retrofit e post-retrofit nel caso di edifici.

Altrimenti occorre poter avere dei valori di riferimento esterni, che permettano di capire la significatività degli impatti. Questo in particolare quando si parla di edifici. In genere si procede cercando di individuare il valore di impatto medio corrente (*benchmark*) di una certa di categoria di prodotti (Ganassali et al., 2018a) o tipologia di edifici (Lavagna et al., 2018). Ci sono anche tentativi di definire tali valori di riferimento rispetto a obiettivi di contenimento degli impatti a livello globale, considerando i *planetary boundaries*, ossia definendo quali limiti di impatto il pianeta è in grado di sopportare. La definizione di *benchmark* (valori di riferimento della prassi corrente) e di *target* (valori obiettivo) è utile e necessario sia per le *policy* sia per la competitività sul mercato (Frischknecht et al., 2019). Vengono infatti applicati o all'interno delle normative (cogenti o premianti) o all'interno dei protocolli di certificazione ambientale degli edifici (*Green Building Rating System*).

Aperte, come già discusso nel paragrafo 0.1.1, sono le questioni relative ai dati ambientali (banche dati ed EPD) e agli strumenti di calcolo, anch'essi fondamentali per garantire una armonizzazione delle valutazioni e la comparabilità dei risultati.

0.1.6 Ampliamento degli indicatori e percorsi in sviluppo

Essendo la metodologia LCA uno dei pilastri dell'approccio *Life Cycle Thinking*, occorre sempre considerare che la valutazione ambientale dovrebbe essere condotta parallelamente alle valutazioni economica e sociale.

La messa a sistema delle tre dimensioni della sostenibilità (ambientale, economica, sociale) e le modalità di sintesi dei risultati sono un ambito ancora poco esplorato e praticato. La

⁷ ISO 21931-1:2010 *Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works - Part 1: Buildings*

ISO 21929-1:2011 *Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings*

ISO/TR 21932:2013 *Sustainability in buildings and civil engineering works - A review of terminology*

ISO/TS 12720:2014 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Guidelines on the application of the general principles in ISO 15392*

ISO/TS 21929-2:2015 *Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works*

ISO 16745-1:2017 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Carbon metric of an existing building during use stage - Part 1: Calculation, reporting and communication*

ISO 16745-2:2017 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Carbon metric of an existing building during use stage - Part 2: Verification*

ISO 21930:2017 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services*

ISO 15392:2019 *Sustainability in buildings and civil engineering works - General principles*

ISO 21931-2:2019 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment - Part 2: Civil engineering works*

ISO 20887:2020 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Design for disassembly and adaptability - Principles, requirements and guidance*

ISO 21678:2020 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Indicators and benchmarks - Principles, requirements and guidelines*

ISO 22057:2022 *Sustainability in buildings and civil engineering works - Data templates for the use of environmental product declarations (EPDs) for construction products in building information modelling (BIM)*

valutazione LCSA *Life Cycle Sustainability Assessment*, che mette insieme le valutazioni LCA *Life Cycle Assessment* (ambientale), LCC *Life Cycle Costing* (economica) e S-LCA *Social-LCA* (sociale), non è ancora così diffusamente applicata e il punto critico è in particolare la sintesi delle tre dimensioni (Invidiata et al., 2018; Amini Toosi et al., 2020; Amini Toosi et al., 2021). Peraltro il tema della sintesi tra indicatori differenti è aspetto critico anche all'interno della stessa LCA: i risultati spesso mostrano andamenti opposti rispetto a indicatori di impatto diversi e dunque operare una scelta rimane difficile, perché non si sa scegliere quale indicatore sia più importante. Per questo spesso si semplicano le valutazioni scegliendo l'indicatore "più rilevante" dal punto di vista degli orientamenti politici (scegliendo il GWP o la PEI). In realtà sarebbe opportuno cercare di capire quale indicatore sia più rilevante effettuando altri tipi di analisi, come la normalizzazione, passaggio metodologico previsto dagli standard LCA come facoltativo. La normalizzazione consente di comparare i risultati rispetto agli impatti totali a scala nazionale o europea, permettendo così di evidenziare quale indicatore risulta rilevante in termini di impatti (Ganassali et al., 2018b). Questa applicazione risulta molto importante perché permette in ogni settore (industriale, energetico, agro-alimentare, edilizio, ecc.) di individuare quali tipi di impatti sono rilevanti, ossia quanto il settore contribuisce rispetto a ciascun indicatore di impatto. Questo potrebbe anche aiutare le *policy* a individuare su quali aspetti sia importante intervenire e quali indicatori di impatto sia importante verificare in analisi LCA di settore.

Rispetto alla sintesi tra indicatori differenti, di impatto o economici-ambientali-sociali, un altro passaggio metodologico previsto dagli standard e che può essere applicato è la pesatura (Invidiata et al., 2018). Su questo passaggio le criticità sono maggiori, perché la pesatura può essere influenzata dalle opinioni (nella procedura *panel of expert*) o dalle politiche in atto (nella procedura *distance-to-target*), per cui allontanarsi da quella oggettività caratterizzante la valutazione LCA.

I percorsi metodologici mirano dunque a un allargamento degli indicatori, aspetto che corre parallelamente agli sforzi di definizione delle assunzioni metodologiche per rendere completa la valutazione LCA (si pensi all'estensione a fasi non solo inerenti alla produzione nella certificazione EPD).

Semplificazione nell'applicazione da un lato ma estensione degli aspetti considerati per rafforzare la valutazione dall'altro sono gli aspetti in continuo sviluppo che vanno temperati per un uso esteso ma efficace della valutazione LCA.

Bibliografia

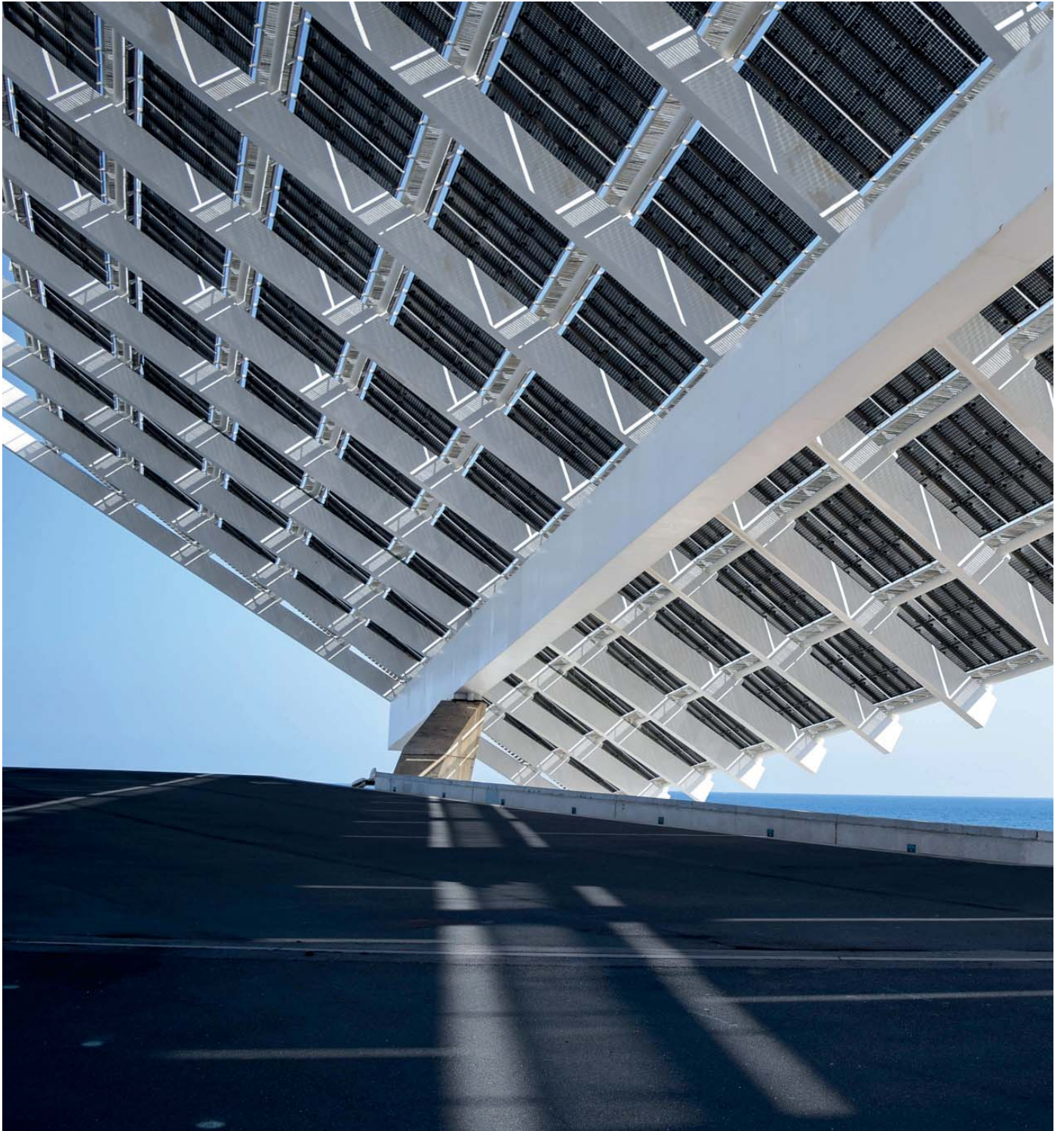
- Amini Toosi H., Lavagna M., Leonforte F., Del Pero C., Aste N., 2020. "Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review", *Sustainable Cities and Society*, vol. 60.
- Amini Toosi H., Lavagna M., Leonforte F., Del Pero C., Aste N., 2021. "Implementing Life Cycle Sustainability Assessment in Building and Energy Retrofit Design. An Investigation into Challenges and Opportunities", in Muthu S. S. (ed), *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*. Springer, pp. 103-136.
- Baldassarri C., Allacker K., Reale F., Castellani V., Sala S., 2017. *Consumer Footprint. Basket of Products indicator on Housing*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Brambilla G., Lavagna M., Vasdravellis G., Castiglioni C.A., 2019. "Environmental benefits arising from demountable steel-concrete composite floor systems in buildings", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 141, pp. 133–142.

- ⁷ CEN/TR 15941:2010 *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Methodology for selection and use of generic data*
EN 15978:2011. *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*.
EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*
EN 16309:2014+A1:2014 *Sustainability of construction works - Assessment of social performance of buildings - Calculation methodology*
EN 16627:2015 *Sustainability of construction works - Assessment of economic performance of buildings - Calculation methods*
CEN/TR 16970:2016 *Sustainability of construction works - Guidance for the implementation of EN 15804*
CEN/TR 17005:2016 *Sustainability of construction works - Additional environmental impact categories and indicators - Background information and possibilities - Evaluation of the possibility of adding environmental impact categories and related indicators and calculation methods for the assessment of the environmental performance of buildings*
EN 15942:2021 *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Communication format business-to-business*
EN 15643:2021 *Sustainability of construction works - Framework for assessment of buildings and civil engineering works*
EN 17472:2022 *Sustainability of construction works - Sustainability assessment civil engineering works - Calculation methods*
prEN 15941 *Sustainability of construction works - Data quality for environmental assessment of products and construction works - Selection and use of data*
prEN 15978-1 *Sustainability of construction works - Methodology for the assessment of performance of buildings - Part 1: Environmental Performance*
prEN 15978-2 *Sustainability of construction works - Methodology for the assessment of buildings - Part 2: Social performance*
prEN 17672 *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Horizontal rules for business-to-consumer communication*
prEN 17680 *Sustainability of construction works - Evaluation of the potential for sustainable refurbishment of buildings*

- Campioli A., Lavagna M., 2013. "Innovazione ambientale dei processi di trasformazione del costruito e ciclo di vita. Environmental innovations in the construction sector and life cycle approach", *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 5, pp. 66-73.
- Campioli A., Mussinelli E., Lavagna M., Tartaglia A., 2020. "Design strategies and LCA of alternative solutions for resilient, circular, and zero-carbon urban regeneration: a case study", in S. Della Torre, S. Cattaneo, C. Lenzi, A. Zanelli (eds), *Regeneration of the Built Environment from a Circular Economy Perspective*, Springer, Research for Development, pp. 205-215.
- Dalla Valle A., Campioli A., Lavagna M., 2020. "Life cycle BIM-oriented data collection: A framework for supporting practitioners", in B. Daniotti, M. Gianinetto, S. Della Torre (eds), *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, Springer, Research for Development, pp. 49-59.
- Dalla Valle A., Lavagna M., Campioli A., 2021. "Analisi di esperienze applicative LCA di edificio: differenze, complementarità, sinergie", *Atti del XIV Convegno della Rete Italiana LCA, La sostenibilità della LCA tra sfide globali e competitività delle organizzazioni*, 9-11 dicembre 2020, Cortina d'Ampezzo (BL), pp. 353-362
- Frischknecht R., Balouktsi M., Lützkendorf T., Aumann A., Birgisdottir H., Grosse Ruse, Hollberg A., Kuittinen M., Lavagna M., Lupišek A., Passer A., Peupartier B., Ramseier L., Röck M., Trigaux D., Vancso D., 2019. "Environmental benchmarks for buildings: needs, challenges and solutions—71st LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 18 June 2019", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24 (12), pp. 2272–2280.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., 2018a. "Green Public Procurement and Construction Sector: EPD and LCA Based Benchmarks of the Whole-Building", in E. Benetto, K. Gericke, M. Guiton (eds), *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies. From Science to Innovation*, Springer, pp. 503-512.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., 2018b. "LCA and Normalisation of environmental LCA based benchmarks for construction materials", *Proceedings 12th LCA Network Conference Life Cycle Thinking in decision-making for sustainability: from public policies to private business*, Messina, 11-12th June 2018, pp. 358-366.
- Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2020. "Circular Economy and Regeneration of Building Stock: Policy Improvements, Stakeholder Networking and Life Cycle Tools", in S. Della Torre, S. Cattaneo, C. Lenzi, A. Zanelli (eds), *Regeneration of the Built Environment from a Circular Economy Perspective*, Springer, Research for Development, pp. 291-301.
- Giorgi S., Lavagna M., Wang K., Osmani M., Liu G., Campioli A., 2022. "Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices", *Journal of Cleaner Production*, vol. 336.
- Invidiata A., Lavagna M., Ghisi E., 2018. "Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings", *Building and Environment*, vol. 139, pp. 58–68.
- Lavagna M., 2005. *Sostenibilità e risparmio energetico. Soluzioni tecniche per involucri eco-efficienti*, Libreria Clup, Milano, pp. 216.
- Lavagna M., 2008. *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano.
- Lavagna M., 2010. "Il ruolo della durata e della manutenzione nella valutazione ambientale del ciclo di vita", in C. Talamo (ed), *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia. Il piano di manutenzione*, Sistemi Editoriali Esselibri, Napoli, pp. 115-127.
- Lavagna M., Paleari M., Mondini D., 2011. *Murature ad alte prestazioni. Valutazioni termiche*,

- acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna (RN).
- Lavagna M., 2012. "Il ruolo delle prestazioni in uso e della durata nella valutazione LCA degli edifici", in F. Asdrubali, G. Beccali, M. Cellura, F. Cuomo, U. Di Matteo, F. Gugliermetti (eds), *L'analisi del ciclo di vita degli edifici. Metodi, strumenti, casi studio*, Celid, Torino, pp. 183-203.
- Lavagna M., Bonanomi M., De Flumeri C., 2012. *Edifici a consumo energetico zero. Orientamenti normativi, criteri progettuali ed esempi di Zero Energy e Zero Emission Buildings*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna (RN).
- Lavagna M., Melià P., Pileri P., Sendyureva V., 2014. "Urban transformation, energy consumption and CO2 emissions", in M. Bovati, M. Caja, G. Floridi, M. Landsberger (eds), *Cities in transformation Research & Design. Ideas, Methods, Techniques, Tools, Case Studies*, Il Poligrafo, Padova, vol. II, pp. 987-994.
- Lavagna M., Giorgi S., Dalla Valle A., 2016. *Abitare in Europa. Analisi dei dati statistici, definizione di modelli rappresentativi e valutazione ambientale LCA del patrimonio residenziale europeo*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna (RN).
- Lavagna M., 2017. "LCA applicate all'edificio: stato dell'arte su alcune questioni metodologiche", in M. Cellura (ed), *Life Cycle Assessment applicate all'edificio. Metodologia e casi di studio sul sistema fabbricato-impianto*, Editoriale Delfino, pp. 129-149.
- Lavagna M., Baldassarri C., Campioli A., Giorgi S., Dalla Valle A., Castellani V., Sala S., 2018. "Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock", *Building and Environment*, vol. 145, pp. 260-275.
- Lavagna M., Bessi A., Meneghelli A., Moschini P., 2019. "La dimensione ambientale della progettazione esecutiva. Esperienze e prospettive future", *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 18, pp. 138-146.
- Lavagna M., Campioli A., Dalla Valle A., Giorgi S., Caroli T., 2020. "Strategie costruttive e valutazioni ambientali per la temporaneità, circolarità, reversibilità", *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 20, pp. 157-166.
- Lavagna M., Dalla Valle A., Giorgi S., Caroli T., Campioli A., 2021. "Circular Processes and Life Cycle Design for Sustainable Buildings", in C. Bevilacqua, F. Calabrò, L. Della Spina (eds), *New Metropolitan Perspectives. Knowledge Dynamics and Innovation-driven Policies Towards Urban and Regional Transition*, vol. 2, Springer, pp. 1448-1457.
- Lavagna M., Campioli A., 2022. "LCA in building sector policies", *Atti del XV Convegno della Rete Italiana LCA, Innovazione e circolarità. Il contributo del Life Cycle Thinking nel Green Deal per la neutralità climatica*, 22-24 settembre 2021, Università Mediterranea di Reggio Calabria, pp. 215-222.
- Lavagna M., Campioli A., Dalla Valle A., Giorgi S., 2022. "Toward carbon neutral urban regeneration: the use of LCA to support competition for innovative, carbon-free and circular architectural projects", *Atti del XV Convegno della Rete Italiana LCA, Innovazione e circolarità. Il contributo del Life Cycle Thinking nel Green Deal per la neutralità climatica*, 22-24 settembre 2021, Università Mediterranea di Reggio Calabria, pp. 36-43.
- Litti G., Audenaert A., Lavagna M., 2018. "Life cycle operating energy saving from windows retrofitting in heritage buildings accounting for technical performance decay", *Journal of Building Engineering*, vol. 17, pp. 135-153.
- Paleari M., Lavagna M., Campioli A., 2016. "The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy", *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, pp. 1667-1690.

1. Decarbonizzazione e stoccaggio del carbonio



1.1 Decarbonizzare il patrimonio edilizio

La fase d'uso degli edifici è responsabile del 40% delle emissioni di gas serra nell'Unione Europea e la messa in pratica di azioni volte alla loro riduzione è strategica ai fini del conseguimento degli obiettivi fissati dalla recente ratifica dell'Accordo di Parigi adottato da 195 paesi fra cui l'Italia, alla conferenza delle parti (COP21) del dicembre 2015. Tali accordi prevedono lo sviluppo di azioni di mitigazione volte a mantenere l'aumento della temperatura media mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Un incremento non superiore a 1,5°C garantirebbe di poter ridurre in maniera significativa molti rischi connessi al cambiamento climatico quali lo scioglimento delle calotte polari e l'innalzamento del livello dei mari, l'aumento della frequenza ed intensità dei fenomeni meteorologici estremi, l'inasprimento del rischio idrogeologico e di inondazione, l'incremento della siccità e del numero di incendi, l'aumento delle ondate di calore, l'estinzione di specie, la variazione della produttività agricola. L'inquinamento provoca inoltre oneri diretti e indiretti per la società e l'economia, come i costi legati alla distruzione di infrastrutture e beni immobili a causa delle alluvioni oppure i costi connessi alla perdita di produttività in settori che sono fortemente influenzati dai livelli delle temperature e delle precipitazioni quali l'agricoltura, la silvicoltura o la produzione di energia. La decarbonizzazione dell'economia diventa un obiettivo di natura etica legato al concetto di sviluppo sostenibile e in cui il settore edilizio può giocare un ruolo di primo piano.

1.1.1 Il ruolo degli edifici nel processo di decarbonizzazione

Molti studi di letteratura (Ramesh et al., 2010; Karimpour et al., 2014) concordano che negli edifici la fase operativa è responsabile della percentuale preponderante degli impatti ambientali di ciclo di vita: l'uso dell'energia per scopi di mantenimento del comfort interno, di consumo di acqua o per servizi di diversa natura, può incidere, in costruzioni tradizionali, per il 60% - 90% della *Cumulative Energy Demand* (cioè dell'energia cumulativa che caratterizza il ciclo di vita della costruzione). L'ammontare delle emissioni climalteranti generate durante la fase operativa degli edifici è direttamente connesso ai consumi energetici e viene quindi a pesare per una percentuale rilevante rispetto ai carichi climatici totali prodotti nel ciclo di vita: lo stock edilizio tradizionale, realizzato in assenza di normative sull'efficienza energetica e che rappresenta una percentuale preponderante in Italia, è caratterizzato da emissioni nella fase operativa che possono superare il 90% di quelle complessive relative all'intero ciclo di vita. La restante parte dei consumi o delle emissioni, se si eccettua lo scenario di fine vita dell'edificio, è legata all'uso indiretto dell'energia cioè all'energia connessa alla produzione dei materiali che compongono le costruzioni. Tale energia viene denominata "energia grigia" o *embodied energy*; analogamente la somma delle emissioni indirette di gas climalteranti legate ai componenti di un edificio viene denominata *embodied carbon* (carbonio incorporato).

Francesco Asdrubali

Presidente dell'Associazione Italiana di Acustica.
Professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale
presso l'Università degli Studi Roma Tre.
Email: francesco.asdrubali@uniroma3.it

Gianluca Grazieschi

Ricercatore Post-Doc presso EURAC - Istituto per
le Energie Rinnovabili.
Email: gianluca.grazieschi@eurac.edu

La legislazione energetica attuale in ambito edile cerca di agire, come azione primaria volta alla riduzione degli impatti ambientali delle costruzioni, sul contenimento dei consumi energetici in fase operativa. Il concetto di “edificio sostenibile” promosso è quindi quello di un immobile caratterizzato da consumi energetici ridotti, cioè un *low-energy building*. D'altronde, la legislazione Europea, attraverso la Direttiva 2010/31/UE (EPBD Recast), promuove la diffusione di *Nearly Zero Energy Buildings* (NZEB) cioè di costruzioni dai ridotti consumi che, tramite l'integrazione di fonti rinnovabili e l'interazione con una rete energetica, sono in grado di garantire un bilanciamento annuale pressoché nullo fra carichi energetici ed energia prodotta in loco. Tali tipologie di edifici rappresentano, dal 2021, lo standard minimo per le nuove costruzioni in Italia.

Va tuttavia riconosciuto che gli sforzi derivanti dalla riduzione degli impatti connessi all'uso diretto dell'energia in fase operativa sono accompagnati da un incremento dei carichi incorporati all'edificio legati alla necessità d'installazione di materiali e sistemi energetici aggiuntivi e, a volte, molto complessi. Le nuove tipologie di edifici possono quindi causare un sensibile *burden shifting* cioè un trasferimento degli impatti da una fase del ciclo di vita a un'altra. In particolare la componente legata agli impatti incorporati acquista un peso sempre maggiore soprattutto per le tipologie di costruzione a elevate prestazioni energetiche: NZEB o *Plus Energy Buildings*, edifici passivi, costruzioni *low-energy*. Per tali tipologie di edifici l'incidenza degli impatti incorporati raggiunge un valore significativo che può superare quello della fase operativa. Secondo Ramesh et al. (2010), ad esempio, il contributo dell'energia incorporata in edifici *low-energy* raggiunge il 45%.

L'analisi di ciclo di vita (LCA) è largamente riconosciuta come una metodologia che garantisce una valutazione dettagliata dei carichi ambientali legati a un prodotto o un servizio “dalla culla alla tomba”. Applicando metodologie LCA è quindi possibile determinare gli impatti incorporati nei materiali che compongono un edificio e paragonarli con quelli della fase operativa; la sua applicazione risulta quindi particolarmente importante per evitare trasferimenti dei carichi ambientali fra le diverse fasi del ciclo di vita di edifici a ridotti consumi energetici. In tal senso, solo una valutazione sull'intero ciclo di vita basata sulla quantificazione dei carichi ambientali relativi alle emissioni di gas climalteranti può essere ritenuta una strategia consistente in una prospettiva di decarbonizzazione del patrimonio edilizio.

1.1.2 Alcuni indicatori: definizioni e benchmarking

Nelle analisi costi/benefici, l'indice che spesso rappresenta le performance monetarie di un progetto è dato dal rapporto fra i profitti o risparmi conseguibili e i costi di sviluppo e di esecuzione. Questo rapporto quantifica il tempo necessario ai profitti cumulati per superare i costi d'investimento ed è chiamato tempo di ritorno o *Economic Payback Time* (EcPBT). Tale concetto può essere esteso all'analisi energetica e ambientale attraverso la definizione di un tempo di ritorno energetico (*Energy Payback Time* - EPBT) e ambientale (*Carbon Payback Time* - CPBT). Un'analisi dei costi energetici connessi a interventi di efficienza energetica dovrebbe includere le quantità di energia impiegata per la costruzione, il trasporto, l'installazione e la manutenzione di tutte le componenti installate. Tuttavia, generalmente, la componente legata ai costi di fabbricazione dei materiali è preponderante rispetto alle altre. Inoltre, se il tempo di ritorno che si vuole determinare è inferiore alla vita utile del componente preso in considerazione, come è lecito aspettarsi per sistemi alimentati da fonti rinnovabili o per

interventi di efficienza energetica, è possibile trascurare la fase di fine vita. Considerando queste ipotesi il tempo di ritorno energetico di un intervento di retrofit può essere definito dal rapporto fra la variazione di energia incorporata nell'edificio ΔEE e i risparmi energetici annuali E_s , conseguibili durante la fase operativa, grazie all'intervento di retrofit in esame. In base alle stesse ipotesi e in modo analogo, il CPBT di soluzioni di retrofit può essere definito dal rapporto tra la variazione di CO_2 equivalente incorporata nell'edificio ΔEC e le emissioni di CO_2 equivalente evitate annualmente C_s , a seguito dell'intervento preso in considerazione.

$$EPBT = \Delta EE / E_s$$

$$CPBT = \Delta EC / C_s$$

Diversi studi di letteratura hanno dimostrato che i valori dei tempi di ritorno ambientali dipendono dallo sviluppo tecnologico dei sistemi di produzione, dai siti e dalle tipologie d'installazione, dai livelli di efficienza e decarbonizzazione delle reti energetiche. I tempi di ritorno dei sistemi alimentati da fonti rinnovabili, ad esempio, dipendono fortemente dalla disponibilità della risorsa che si vuole sfruttare nel luogo di installazione (Fraunhofer ISE, 2006).

Un limite degli indicatori di *payback* è la loro incapacità di descrivere il potenziale complessivo di risparmio energetico o di decarbonizzazione. Per tale ragione essi possono essere affiancati da ulteriori indicatori come l'indice di rendimento energetico (*Energy Return Ratio* - ERR), l'indice di rendimento della CO_2 (*Carbon Return Ratio* - CRR) e l'impronta di carbonio (*Carbon Footprint* - CF). Il primo rappresenta quante volte i risparmi energetici conseguiti nell'intero ciclo di vita sono superiori rispetto all'*embodied energy* di un intervento: tale valore può essere determinato semplicemente dividendo la vita utile del componente per il suo EPBT. Il CRR viene definito in modo simile considerando il CPBT. La *Carbon Footprint* (CF), invece, stima le emissioni gas serra causate da un prodotto o servizio nel suo ciclo di vita; nel caso di un intervento di risparmio energetico o di un impianto alimentato da rinnovabili, l'unità funzionale che permette di descrivere il suo reale potenziale di decarbonizzazione rispetto ad altre soluzioni è il kWh di energia risparmiata o prodotta. La Tabella 1.1.1 riporta alcuni valori di EPBT, CPBT e CF per alcuni interventi di riqualificazione energetica; la Tabella 1.1.2 mostra invece alcuni valori relativi all'EER e al CRR.

1.1.3 Casi studio

Calcolo dei tempi di ritorno per gli interventi di retrofit di una scuola

Il primo caso studio riportato è rappresentato da un edificio scolastico (I.T.I.S. Giuseppe Peano) situato a Torino. La costruzione principale, che ospita le funzioni didattiche ed amministrative, è caratterizzata da una forma a U che definisce una corte interna in cui è situata la palestra. L'edificio è stato costruito prima della legge 373 del 1976 (Parlamento Italiano 1976) ed è caratterizzato da alti consumi energetici, principalmente per il riscaldamento degli ambienti (62% del totale) e per l'illuminazione (35% del totale). La classificazione energetica dell'edificio fornisce un valore di EPgl pari a 262 kWh/m²a che lo pone in classe D (Corrado et al., 2016). La modellazione dell'edificio con dati calibrati sull'utenza reale restituisce, invece, un valore di consumo globale di energia primaria pari a 157 kWh/m²a. Date le scarse performance energetiche dell'edificio, il potenziale risparmio di energia, di emissioni e di costi operativi legato ad un intervento di retrofit è elevato e gli indicatori di *payback* possono essere

| Riferimento | Tecnologia | EPBT [anni] | CPBT [anni] | CF [gCO ₂ /kW h] |
|--|--|-------------|-------------|-----------------------------|
| (The US National Renewable Energy Laboratory 2004) | Silicio Policristallino su tetto | 3,8 | - | - |
| (Asdrubali et al., 2019) | Impianto da 40 kW su tetto a Torino | 4,9 | - | - |
| (Ardente et al., 2011) | Impianto FV su tetto a Stoccarda | 4,8 | 3,8 | - |
| (Ardente et al., 2011) | Impianto FV su tetto a Brno | 2,1 | 1,4 | - |
| (Ardente et al., 2011) | Impianto FV su tetto a Gol | 1,5 | 6,1 | - |
| (Zhang et al., 2018) | Modulo fotovoltaico multi-Si | 2 | - | 35 |
| (Zhang et al., 2018) | Modulo fotovoltaico mono-Si | 2,2 | - | 37 |
| (Battisti, Corrado, 2005) | Impianto in multi-Si su tetto | 3,3 | - | - |
| (Pacca et al., 2007) | Impianto da 33 kW in multi-Si su tetto | 5,7 | - | 72,4 |
| (Fraunhofer ISE, 2006) | Modulo FV in multi-Si (Italia centrale) | 1,3 | - | - |
| (de Wild-Scholten, Alsema, 2005) | Impianto in mono-Si su tetto | 2,6 | - | 41 |
| (de Wild-Scholten, 2013) | Impianto in mono-Si su tetto | 1,96 | - | 38,1 |
| (de Wild-Scholten, 2013) | Impianto in multi-Si su tetto | 1,24 | - | 27,2 |
| (Marimuthu et al., 2014) | Impianto FV su tetto | 2,6 | 0,61 | - |
| (Hu et al., 2016) | Impianto FV con tracking | 2,61 | - | 107,7 |
| (Ito et al., 2010) | Impianto FV 1 GW mono-Si deserto del Gobi | 2,5 | - | 50 |
| (Raugei et al., 2007) | Modulo fotovoltaico multi-Si | 2,4 | - | 72 |
| (Jungbluth, 2005) | Impianto FV da 3 kW su tetto in Svizzera | 3-6 | 2,8-5 | 39-110 |
| (Croxford, Scott, 2006) | Impianto FV residenziale in UK | - | 6 | - |
| (Croxford, Scott, 2006) | Impianto solare termico residenziale in UK | - | 2,2 | - |
| (Kalogirou, 2004) | Impianto solare termico a Cipro | - | 1,2-3,7 | - |
| (Crawford, Treloar, 2004) | Impianto solare termico a Melbourne | - | 0,5 | - |
| (Alsema, Nieuwlaar, 2000) | Moduli in a-Si senza telaio in EU | 1,6-3 | - | - |
| (Carnevale et al., 2014) | Impianto solare termico in Italia | - | 1,06 | - |
| (Comodi et al., 2016) | Pannello solare termico su tetto | <1 | 1-2,5 | - |
| (Gounaris, 2014) | Caldaia a gasolio – pompa di calore | - | 3,2 | - |
| (Beccali et al., 2013) | Caldaia a gpl – caldaia condensazione | 4,74 | 3,81 | - |
| (Beccali et al., 2013) | Isolamento termico d'involucro | 21-30 | 27-34 | - |
| (Huang et al., 2012) | Schermatura solare | 46 | 64 | - |

Tabella 1.1.1 Valori di letteratura relativi ad EPBT, CPBT e CF di alcuni interventi di riqualificazione energetica

| Tecnologia | Vita utile [anni] | ERR [-] | CRR [-] |
|---------------------------------------|-------------------|---------|---------|
| Impianto PV su tetto | 20 | 5-10 | 4-6 |
| Impianto solare termico su tetto | 20 | 20-30 | 9-20 |
| Caldaia a gasolio – pompa di calore | 20 | 5 | 6 |
| Caldaia a gpl – caldaia condensazione | 20 | 4,2 | 5,2 |
| Isolamento termico di involucro | 50 | 1,6-2,4 | 1,4-1,8 |
| Schermature solari | 50 | 1,1 | 0,8 |

Tabella 1.1.2 EER e CRR medi per alcuni interventi di riqualificazione energetica (rielaborazione personale su dati di letteratura).

impiegati per la valutazione dell'efficacia delle diverse soluzioni ipotizzabili. In particolare sono stati valutati quattro scenari di retrofit:

1) Una soluzione *cost-optimal* che è stata individuata attraverso un algoritmo di ottimizzazione dei costi di ciclo di vita. Essa prevede un isolamento "leggero" dell'involucro, l'installazione di un impianto fotovoltaico da 40 kW, la sostituzione delle lampade fluorescenti con lampade a LED e l'introduzione di sistemi di controllo e regolazione sia per la temperatura degli ambienti che per l'illuminazione. A seguito dell'implementazione di tale intervento si potrebbe raggiungere un valore di consumo di energia primaria pari a 70 kWh/m²a (18% da rinnovabile).

2) Una soluzione conforme al DM 26 Giugno 2015 in cui l'involucro edilizio e gli impianti sono stati riqualificati in modo da rispettare i limiti imposti dal Decreto (Requisiti Minimi). A tale scopo il generatore di calore presente è stato sostituito con una pompa di calore ed impianti alimentati da fonti rinnovabili sono stati integrati nell'edificio: è stata prevista l'installazione di 6 m² di collettori solari e di un impianto fotovoltaico da 60 kW. La modellazione energetica calibrata sull'utenza reale ha restituito un valore di consumo globale di energia primaria pari a 71 kWh/m²a.

3) Una prima soluzione che permette il raggiungimento dello standard NZEB è caratterizzata da un edificio alimentato esclusivamente da energia elettrica. Rispetto alla soluzione precedente, l'isolamento d'involucro viene incrementato, le lampade fluorescenti vengono sostituite con lampade a LED e l'impianto fotovoltaico viene potenziato fino a 80 kW. La simulazione calibrata fornisce un valore pari a 51 kWh/m²a di cui il 54% coperti da rinnovabile.

4) Una seconda soluzione che permette il raggiungimento dello standard NZEB è la soluzione NZEB 2 che, a differenza della NZEB 1, prevede la sostituzione del generatore di calore con una caldaia a biomassa da 231 kW e non con una pompa di calore; la caldaia a biomassa viene accoppiata con un sistema di accumulo dell'acqua calda da 5780 litri. Il consumo annuo di energia primaria risulta pari a 42 kWh/m²a che sono coperti per il 66% da fonti rinnovabili.

A seguito della definizione dei diversi scenari di retrofit sono stati calcolati i rispettivi tempi di ritorno sia economici che ambientali (Asdrubali et al., 2019). Ciò ha permesso di valutare la consistenza delle diverse soluzioni sia da un punto di vista economico che energetico e di decarbonizzazione.

I valori di *payback time* calcolati sono riportati in Figura 1.1.1. Il paragone fra i tempi di ritorno mostra che il *payback* economico è sempre maggiore dei *payback* energetico e della CO₂. Confrontando i *payback* delle soluzioni di retrofit, si può osservare che la soluzione *cost-optimal*, caratterizzata dal minor *payback* economico, ha anche i valori più bassi di *payback* energetico e di quello della CO₂. Tale scenario acquista quindi una forte rilevanza per il retrofit da ogni punto di vista.

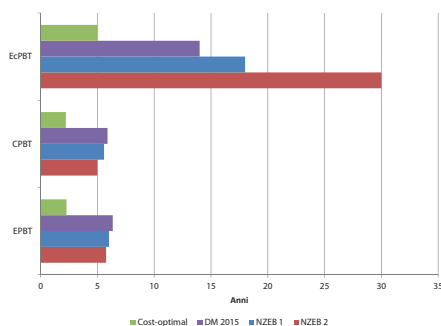


Figura 1.1.1 Tempi di ritorno economici (EcPBT), energetici (EPBT) e della CO₂ (CPBT). Fonte: Asdrubali et al. 2019.

Il calcolo dei tempi di ritorno di ogni singolo intervento implementato all'interno dei diversi scenari di retrofit ha permesso di valutare i rispettivi potenziali di risparmio energetico e decarbonizzazione. Gli interventi più competitivi da un punto di vista ambientale sono risultati quelli riguardanti gli impianti: la sostituzione del generatore di calore con pompa di calore o caldaia a biomassa, la sostituzione delle lampade fluorescenti con lampade a LED e l'installazione di un impianto fotovoltaico. Tali interventi risultano avere tempi di ritorno energetici molto bassi (da 4 mesi per i LED a 1 anno e 7 mesi per il fotovoltaico) e sono caratterizzati, all'interno del loro ciclo di vita, da un elevato potenziale sia di risparmio energetico che di decarbonizzazione. I valori di *payback* calcolati sono, infatti, notevolmente inferiori rispetto alla vita utile dei componenti considerati. Gli interventi riguardanti l'isolamento d'involucro sono invece risultati i meno performanti a causa degli elevati costi energetici connessi alla produzione e all'installazione dei materiali.

Decarbonizzazione e GWP degli edifici

Nel secondo caso di studio, allo scopo di valutare la sensitività dei risultati riguardanti il *Global Warming Potential* (GWP) di un immobile rispetto a diversi scenari di decarbonizzazione della produzione di energia elettrica, è stato scelto un edificio "completamente elettrico" (Asdrubali et al. 2020). Si tratta di un fabbricato di due piani e 122 m² di superficie interna caratterizzato da una struttura leggera in legno altamente isolata: i valori di trasmittanza termica dei componenti di involucro sono ampiamente inferiori rispetto agli attuali limiti di normativa (Ministero dello Sviluppo Economico, 2015). Anche il sistema impiantistico è molto efficiente e composto da una pompa di calore, da un pavimento radiante per il riscaldamento e da ventilconvettori per il raffrescamento. Un impianto fotovoltaico da 3,5 kW è a servizio dell'edificio. Gli assorbimenti di energia elettrica dell'edificio sono stati monitorati per l'anno 2015 e sono pari a 19 kWh/m²a per il riscaldamento e 17 kWh/m²a per il raffrescamento (gli altri contributi sono trascurabili). Il sistema fotovoltaico garantisce una produzione di energia elettrica pari a 44 kWh/m²a che permette di considerare l'edificio come un NZEB. Gli scenari di decarbonizzazione ipotizzati si basano sulla Strategia Energetica Nazionale - SEN 2017 (Ministero dello Sviluppo Economico, 2017) e sul World Energy Model (WEM (IEA 2017):

- lo "Scenario base" (CPS) prevede la continuazione delle politiche adottate fino a metà 2017 ed è volto al raggiungimento di una percentuale di copertura da rinnovabile pari al 42% nel 2030;
- lo Scenario di implementazione di nuove politiche (NPS), che includono l'accordo di Parigi, mira al raggiungimento di una copertura da rinnovabile pari al 55% nel 2030;
- lo Scenario di sviluppo sostenibile (SDS) considera un ulteriore incremento di azioni volte alla decarbonizzazione nel periodo dal 2030 al 2050 fino al raggiungimento del 85% della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

A partire dai mix energetici legati alla generazione di energia elettrica ipotizzati all'interno dei diversi scenari adottati è stato possibile calcolare l'evoluzione del valore d'intensità di carbonio dell'unità di energia elettrica prelevata dalla rete (gCO_2eq/kWh_e) come riportato in Figura 1.1.2. L'applicazione di metodologie LCA ha permesso di calcolare il GWP dell'edificio. Utilizzando fattori di conversione asimmetrici per l'energia importata ed esportata in rete dall'edificio (449 gCO₂/kWh per caratterizzare le importazioni e 0 gCO₂/kWh per le esportazioni) si ottengono i valori di GWP dell'edificio riportati in Figura 1.1.3. L'analisi LCA tradizionale, che non include ipotesi riguardanti l'evoluzione dell'intensità di carbonio dell'elettricità prelevata dalla rete, fornisce un valore di GWP pari a 32 kg CO₂/m²a di cui il 31% riconducibile alla fase operativa. L'inclusione della decarbonizzazione dell'energia elettrica nel calcolo dell'impatto sul cambiamento climatico dell'edificio permette di valutare

gli effetti del taglio della componente legata alle emissioni in fase operativa: la riduzione massima ottenuta, considerando l'implementazione del NPS fino al 2030 e del SDS fino al 2050, è stata pari al 20% con il NPS che garantisce una riduzione pari al 9% nel 2030. Risultati meno significativi si hanno in caso di continuazione delle attuali politiche fino al 2030 (CPS, -4%).

1.1.4 Conclusioni

Il calcolo degli indicatori di *payback time* risulta molto importante per la valutazione dell'efficacia ambientale di interventi di riqualificazione energetica degli edifici o per la selezione di alternative progettuali che sono in grado di generare benefici ambientali nel loro ciclo di vita. Gli interventi riguardanti gli impianti sono risultati essere molto competitivi da questo punto di vista rispetto alle soluzioni d'isolamento d'involucro.

Nel caso di riqualificazioni energetiche di edifici tradizionali, l'incremento dell'efficienza dei generatori è un intervento che risulta molto vantaggioso sia da un punto di vista economico che ambientale. Maggiori benefici si hanno in caso di installazione di pompe di calore elettriche abbinate a elementi terminali che operano a bassa temperatura. L'integrazione di sistemi di generazione locale alimentati da fonti rinnovabili, come impianti fotovoltaici o solari termici, rappresenta infine un'altra soluzione con elevata potenzialità di decarbonizzazione: bassi *payback*, ridotta *carbon footprint* ed ERR/CRR elevati.

Nel caso di *carbon payback times*, il calcolo dovrebbe far uso di valori LCA aggiornati dell'intensità di carbonio caratterizzante i vettori energetici coinvolti ed includere valutazioni di sensitività riguardanti gli scenari di decarbonizzazione in atto. Se, infatti, gli interventi di risparmio energetico o d'installazione d'impianti alimentati da fonti rinnovabili contribuiscono alla decarbonizzazione dell'ambiente che li circonda, è anche vero che il loro potenziale nella riduzione delle emissioni climalteranti dipende dall'intensità di carbonio che caratterizza i sistemi energetici da cui l'edificio si approvvigiona. Maggiore è l'intensità di carbonio legata all'energia prelevata dalle reti energetiche che interagiscono con l'edificio e maggiori sono le emissioni evitate attraverso l'implementazione di interventi di efficienza energetica o l'introduzione di impianti alimentati da rinnovabili; al contrario, se le reti energetiche da cui l'edificio si approvvigiona sono già ampiamente decarbonizzate, il potenziale di tali interventi risulterà minore e i loro CPBT maggiori.

Per una valutazione complessiva degli interventi è inoltre necessario affiancare all'ottimizzazione ambientale, mirata alla minimizzazione dei consumi energetici o delle emissioni climalteranti sull'intero ciclo di vita, quella economica volta all'individuazione di soluzioni la cui combinazione produce risultati ottimali anche da un punto di vista di costo. Sebbene nel caso studio della scuola l'ottimizzazione economica ed energetica abbia generato risultati comparabili, non è detto che tale coincidenza sia sempre verificata.

Bibliografia

- Alsema E.A, Nieuwlaar E., 2000. "Energy Viability of Photovoltaic Systems", *Energy Policy*, vol. 28 (14), pp. 999–1010.
- Ardente F., Beccali M., Cellura M., Mistretta M., 2011. "Energy and Environmental Benefits in Public Buildings as a Result of Retrofit Actions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

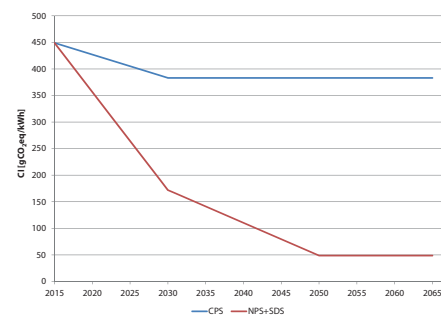


Figura 1.1.2 Scenari di evoluzione dell'intensità di carbonio legata alla produzione di elettricità (220 V). Fonte: Asdrubali et al. 2020.

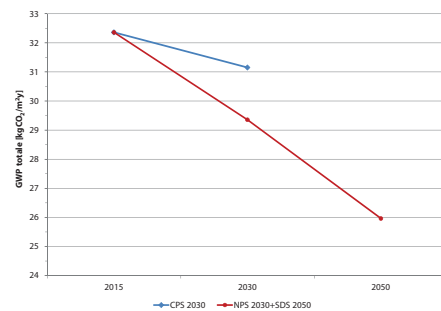
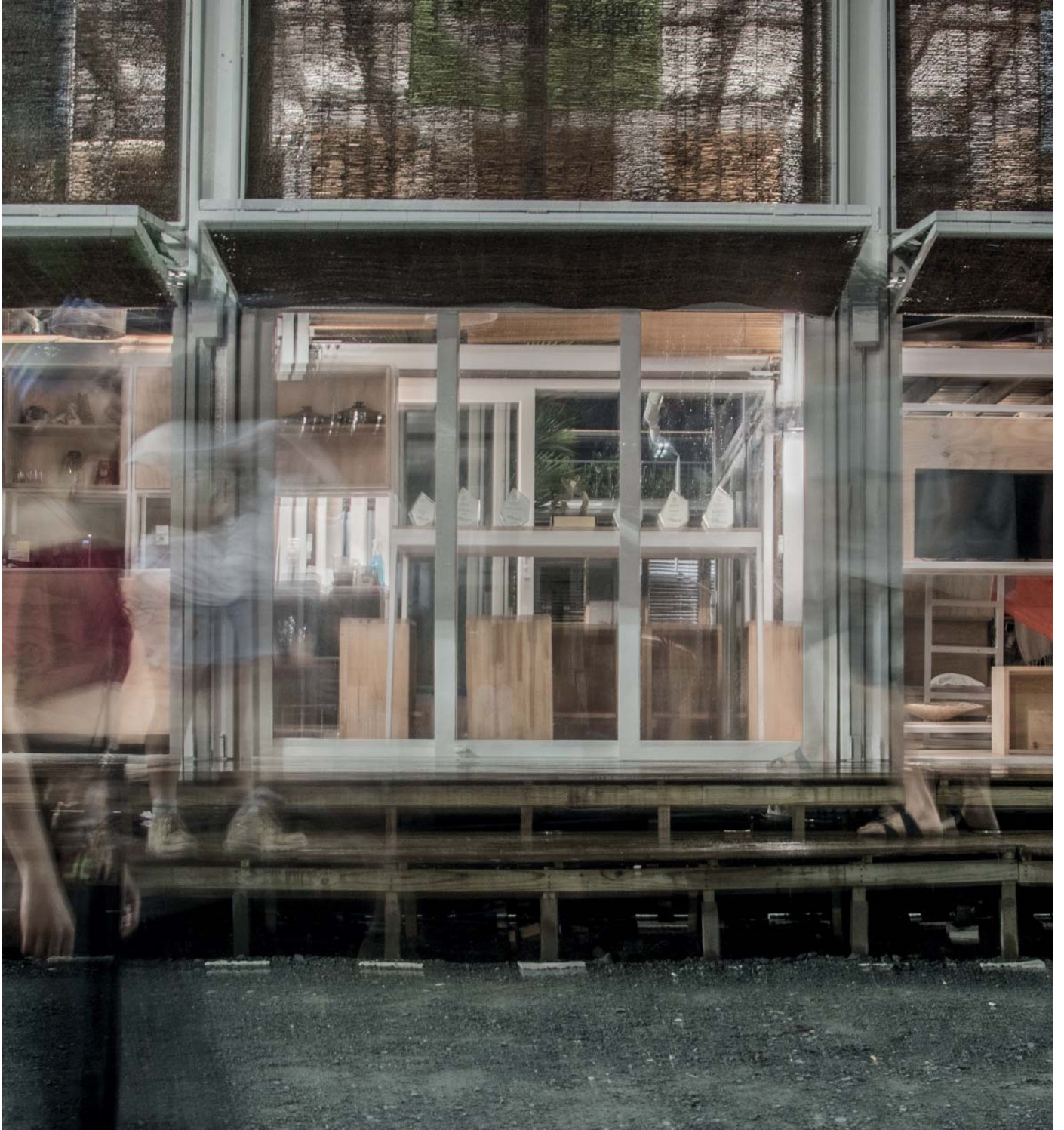


Figura 1.1.3 Global Warming Potential dell'edificio considerando diversi scenari di decarbonizzazione. Fonte: Asdrubali et al. 2020.

- vol. 15 (1), pp. 460-70.
- Asdrubali F., Baggio P., Prada A., Grazieschi G., Guattari C., 2020. "Dynamic Life Cycle Assessment Modelling of a NZEB Building", *Energy*, vol. 191, pp. 116489.
- Asdrubali F., Ballarini I., Corrado V., Evangelisti L., Grazieschi G., Guattari C., 2019. "Energy and Environmental Payback Times for an NZEB Retrofit" *Building and Environment*, vol. 147, pp. 461-72.
- Asdrubali, F., Roncone, M., Grazieschi, G., 2021. "Embodied energy and embodied gwp of windows: A critical review", *Energies*, vol. 14 (13), 3788.
- Grazieschi, G., Asdrubali, F., Thomas, G., 2021. "Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review", *Cleaner Environmental Systems*, vol 2, 100031.
- Battisti R., Corrado A., 2005. "Evaluation of Technical Improvements of Photovoltaic Systems through Life Cycle Assessment Methodology. *Energy*, vol. 30 (7), pp. 952-67.
- Carnevale E., Lombardi L., Zanchi L., 2014. "Life Cycle Assessment of Solar Energy Systems: Comparison of Photovoltaic and Water Thermal Heater at Domestic Scale", *Energy*, vol. 77, pp. 434-46.
- Comodi G., Bevilacqua M., Caresana F., Paciarotti C., Pelagalli L., Venella P., 2016. "Life Cycle Assessment and Energy-CO₂-Economic Payback Analyses of Renewable Domestic Hot Water Systems with Unglazed and Glazed Solar Thermal Panels", *Applied Energy*, vol. 164, pp. 944-955.
- Corrado V., Ballarini I., Paduos S., Tulipano L., Signoretti P., 2016. "Riquilificazione Energetica Degli Edifici Pubblici Esistenti: Direzione NZEB Studio Dell'edificio Scolastico Di Riferimento Nel Nord Italia (Zona Climatica E: 2.100 <GG ≤ 3.000). Report RdS/2015/120." Roma. http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti_ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-nzeb/rds_par2015-120.pdf.
- Crawford R.H., Treloar G.J., 2004. "Net Energy Analysis of Solar and Conventional Domestic Hot Water Systems in Melbourne, Australia", *Solar Energy*, vol. 76 (1-3), pp. 159-63.
- Croxford B., Scott K., 2006. "Can PV or Solar Thermal Systems Be Cost Effective Ways of Reducing CO₂ Emissions for Residential Buildings?" in R. Campbell-Howe (ed), *Solar 2006: Renewable Energy - Key to Climate Recovery*, 35th American Solar Energy Society (ASES) Annual Conference, Denver, US.
- de Wild-Scholten M.J., 2013. "Energy Payback Time and Carbon Footprint of Commercial Photovoltaic Systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 119, pp. 296-305.
- de Wild-Scholten M.J., Alsema E.A., 2005. "The Real Environmental Impacts of Crystalline Silicon PV Modules: An Analysis Based on up-to-Date Manufacture Data", *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 6-10 Giu.
- Fraunhofer ISE, 2006. "Energy Pay-Back Time of Multicrystalline Silicon PV Rooftop Systems - Geographical Comparison". <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
- Gounaris I., 2014. *Environmental Performance Assessment of Heat Pumps*, <http://hdl.handle.net/11544/136>.
- Grazieschi G., Gori P., Lombardi L., Asdrubali F., 2020. "Life cycle energy minimization of autonomous buildings", *Journal of Building Engineering*, vol. 30.
- Hu A., Huang L., Lou S., Kuo C.H., Huang C.Y., Chian K.J., Chien H.T., Hong H.F., 2016. "Assessment of the Carbon Footprint, Social Benefit of Carbon Reduction, and Energy Payback Time of a High-Concentration Photovoltaic System", *Sustainability*, vol. 9 (1), pp. 27.
- Huang Y., Niu J.L., Chung T.M., 2012. "Energy and Carbon Emission Payback Analysis for Energy-Efficient Retrofitting in Buildings - Overhang Shading Option", *Energy and Buildings*, vol.

- 44 (1), pp. 94–103.
- International Energy Agency (IEA), 2017. *World Energy Model Documentation*, 1–77. www.iea.org/weo/.
- Ito M., Komoto K., Kurokawa K., 2010. "Life-Cycle Analyses of Very-Large Scale PV Systems Using Six Types of PV Modules", *Current Applied Physics*, vol. 10 (2), pp. S271–73.
- Jungbluth, Niels. 2005. "Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss Ecoinvent Database", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13 (5), pp. 429–46.
- Kalogirou S.A., 2004. "Environmental Benefits of Domestic Solar Energy Systems", *Energy Conversion and Management*, vol. 45 (18–19), pp. 3075–92.
- Karimpour M., Belusko M., Xing K., Bruno F., 2014. "Minimising the Life Cycle Energy of Buildings: Review and Analysis", *Building and Environment*, vol. 73, pp. 106–14.
- Marimuthu M., Kirubakaran V., Rajasekaran R., 2014. "Energy Pay Back Period and Carbon Pay Back Period for Solar Photovoltaic Power Plant", *International Journal of Chemical Sciences*, vol. 12 (1).
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2015. Decreto Ministeriale 26 Giungo 2015. "Applicazione delle Metodologie di Calcolo delle Prestazioni Energetiche e Definizione delle Prescrizioni e dei Requisiti Minimi degli Edifici". *Gazzetta Ufficiale Serie Generale* n.162 del 15-07-2015 - Supplemento Ordinario n. 39.
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2017. *Strategia Energetica Nazionale*, <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/194-comunicati-stampa/2037349-ecco-la-strategia-energetica-nazionale-2017>.
- Pacca S., Sivaraman D., Keoleian G.A., 2007. "Parameters Affecting the Life Cycle Performance of PV Technologies and Systems", *Energy Policy*, vol. 35 (6), pp. 3316–26.
- Parlamento della Repubblica Italiana, 1976. Legge del 30 Aprile 1976 numero 373 - *Norme per Il Contenimento del Consumo Energetico per Usi Termici Negli Edifici*.
- Ramesh T., Prakash R., Shukla K.K., 2010. "Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview." *Energy and Buildings*, vol. 42 (10), pp. 1592–1600.
- Raugei M., Bargigli S., Ulgiati S., 2007. "Life Cycle Assessment and Energy Pay-Back Time of Advanced Photovoltaic Modules: CdTe and CIS Compared to Poly-Si", *Energy*, vol. 32 (8), pp. 1310–18.
- The US National Renewable Energy Laboratory. 2004. *NREL Report No. NREL/FS-520-24619*, <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>.
- Zhang T., Wang M., Yang H., 2018. "A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems", *Energies*, vol. 11 (11), pp. 3157.



1.2 Embodied Carbon and Energy. Indicatori per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio

In edilizia l'analisi del ciclo di vita si può ascrivere a due ambiti; il primo è finalizzato allo studio delle prestazioni dell'edificio nel suo complesso e nella sua complessità, il secondo ha invece come obiettivo la valutazione di prodotti e componenti e fa altresì riferimento alle singole parti che costituiscono un manufatto edilizio. Tale distinzione trova corrispondenza in norme cogenti (ad esempio il sistema di certificazione Svizzero Minergie®) e in alcune norme tecniche. In particolare la EN 15978:2011 *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method* è orientata a stabilire i metodi e gli strumenti che concorrono a un'analisi dell'edificio in relazione al processo edilizio.

In coerenza con gli standard menzionati, il Gruppo di ricerca Tecnologia e Ambiente del Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino è, da alcuni anni, impegnato nella definizione di metodologie di analisi e valutazione appropriate al contesto edilizio e nello sviluppo di strumenti in grado di caratterizzare le prestazioni dell'edificio, anche attraverso indicatori correlati alle operazioni di analisi di inventario e di valutazione degli impatti.

Più in dettaglio il contributo intende illustrare i risultati di un progetto di ricerca che ha portato alla realizzazione di un modello di calcolo *open source*, destinato ad alcuni attori del processo edilizio interessati a conoscere l'impatto dell'edificio nelle principali fasi del suo ciclo di vita. EURECA – *Eco-Utility for Reduction of Energy and Carbon* – è in grado di caratterizzare le principali fasi del ciclo di vita dell'edificio attraverso due indicatori principali:

- *Embodied Energy*, che definisce i fabbisogni di energia primaria e il consumo di risorse energetiche di origine fossile;
- *Embodied Carbon*, che quantifica i rilasci in atmosfera di alcune categorie di gas climalteranti e la quantità assorbita da alcuni materiali nei processi di produzione fuori opera.

EURECA è il risultato di un'attività che ha richiesto un notevole impegno temporale, i cui contenuti (data base e algoritmi di calcolo) sono ciclicamente oggetto di revisione. La sua ultima *realize* – disponibile anche in lingua inglese – è stata utilizzata per verificare alcuni requisiti ambientali di progetto previsti dal bando Solar Decathlon Latino America and Caribbean nel quale il Politecnico di Torino è impegnato in qualità di partner della Universidad Javeriana de Bogotá (Colombia) e della Oxford Brooks University (UK).

1.2.1 Introduzione

L'industria delle costruzioni in Europa, e in particolare Italia, sembra vivere un profondo stato di crisi, temporalmente molto lungo. In realtà è un settore in pieno sviluppo. A ricordarlo è Fatih Birol, direttore dell'International Energy Agency (IEA), che nella prefazione del *Global Status Report 2017, Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector* descrive come nei prossimi 40 anni si preveda la realizzazione di oltre 230 miliardi di

Roberto Giordano

Professore associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, unità di ricerca Tecnologia e Ambiente.

Email: roberto.giordano@polito.it

metri quadrati di nuove costruzioni (UNEP, 2017). I successivi report (UNEP, 2020) non hanno registrato alcuna inversione di tendenza. Inoltre l'attività edilizia è energivora: i consumi sono passati da 119 Exajoule (EJ) nel 2010 a circa 125 EJ nel 2016, con lievi variazioni negli anni successivi. La maggior parte delle risorse energetiche di origine fossile utilizzate per soddisfare i fabbisogni energetici sono rimaste pressoché costanti, nello stesso periodo, intorno a 45 EJ (IEA, 2017).

L'analisi dei dati concernenti le emissioni di anidride carbonica restituisce, invece, un panorama caratterizzato da luci e ombre. Se da un lato si assiste al passaggio da 9,5 Giga tonnellate di CO₂ (Gt) del 2013 alle 9,0 Gt del 2016 associate ai consumi per usi termici ed elettrici, della cosiddetta fase d'uso degli edifici, dall'altro si registra un aumento delle emissioni associate in particolare alla fase iniziale del ciclo di vita, quella che nella letteratura tecnica coincide con la fase di produzione fuori opera. Nel complesso alla produzione di materiali e componenti per gli edifici è associato un incremento costante delle emissioni di CO₂, che sono passate da 3,1 Gt nel 2010 fino a 3,7 Gt nel 2016 e aumentate gradualmente fino al 2020. Si tratta di oltre un terzo del totale delle emissioni rilasciate in atmosfera, che conferma le previsioni di alcune pubblicazioni, focalizzate a indagare le relazioni che intercorrono tra fabbisogni energetici e rilasci di gas a effetto serra nell'intero ciclo di vita dell'edificio (Benjamin, 2017; Pacheco-Torgal et al., 2013; Engin, Frances, 2010).

Le emissioni associate alle risorse energetiche impiegate per produrre e climatizzare gli edifici, anche se si costruisce meno in Italia e in Europa, costituiscono un problema serio, poiché hanno effetti globali che riguardano tutti; i rilasci di anidride carbonica in località che paiono remote comportano infatti rischi in luoghi che ci sono prossimi, a partire dall'innalzamento del livello del mare Adriatico, fino allo scioglimento progressivo dei ghiacciai delle regioni Alpine (Jacobs, 2016).

Un altro fattore che ha effetti rilevanti nel settore delle costruzioni è da ricondurre alla crescita della popolazione mondiale, cui è associato un aumento della richiesta di beni e servizi; il miglioramento delle condizioni di benessere abitativo non può essere negato, ma il benessere, almeno secondo l'attuale modello di sviluppo, richiede energia, e come è noto l'energia è ancora diffusamente ricavata da fonti fossili (IEA, 2019).

L'Europa persegue obiettivi ambiziosi. Ha introdotto direttive, leggi, standard e regolamenti finalizzati a limitare fabbisogni energetici e rilasci in acqua, aria e suolo, con riferimento all'intero ciclo di vita dell'edificio, ma si tratta di un corpus di norme che si rivolge a una porzione limitata di Nazioni. L'International Energy Agency (IEA) ricorda infatti che entro il 2060 più della metà dei nuovi edifici sarà costruita in Paesi che, almeno in questo momento, non hanno introdotto requisiti specifici di contenimento dei consumi energetici (IEA, 2017). Azioni e iniziative si rendono comunque necessarie per affrontare le sfide del cambiamento climatico, a prescindere da chi in questo momento produce più emissioni. È pertanto ancora necessario mettere a punto strumenti – organizzati e articolati secondo diversi livelli di complessità – utili ad assistere gli attori del processo edilizio, partendo da presupposto che ci sono generazioni vecchie e nuove di architetti, designer e ingegneri edili che non lavorano e non lavoreranno in Europa; professionisti che operano in contesti diversi da quelli locali ed europei, dove non vi è ancora una cultura diffusa dei sistemi di certificazione di prodotto e di edificio.

1.2.2 Indicatori per il settore delle costruzioni delle basati su un approccio al ciclo di vita dell'edificio: *Embodied Energy (EE)* – *Embodied Carbon (EC)*

In un contesto come quello appena descritto uno studio *Life Cycle Assessment (LCA)* può sembrare di difficile applicabilità specie, come evidenziato, in luoghi dove è necessario garantire prioritariamente condizioni più diffuse di benessere sociale e solo successivamente lavorare nella direzione della salvaguardia ambientale. L'uso delle certificazioni ambientali come le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (*Environmental Product Declaration – EPD*) sembra, almeno per ora, destinato a un numero limitato di attori che operano in ambito edilizio. Nel frattempo in altre nazioni si continuano ad utilizzare metodologie che sono solo in parte basate sui contenuti degli standard LCA, pur condividendo in molti casi l'analisi dei flussi di input e di output, attraverso eterogenei indicatori di valutazione (IEA, 2016).

Emerge dunque, con particolare riferimento al settore delle costruzioni, la necessità di condividere una strategia sistemica, concepita per essere adottabile da tutti e applicabile con diversi livelli di intensità in relazione alle potenzialità di una nazione. Un esempio di notevole interesse sono le azioni chiave proposte dalla Global Alliance for Buildings and Construction Work Areas, che comprendono:

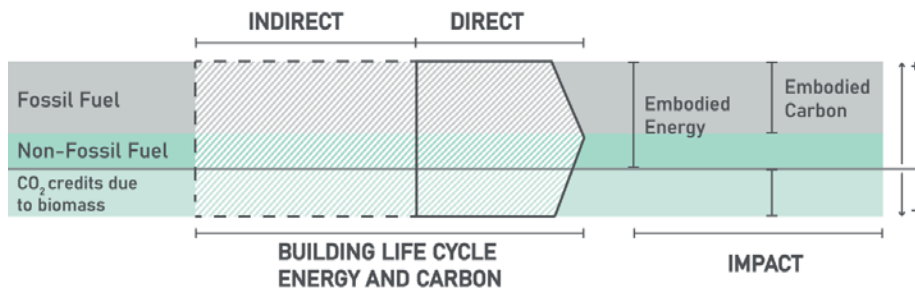
- 1) la crescita della consapevolezza delle persone in merito al consumo di fonti non rinnovabili e ai cambiamenti climatici;
- 2) la pianificazione urbana finalizzata a una migliore efficienza energetica e a un più ampio utilizzo delle fonti rinnovabili;
- 3) il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici esistenti;
- 4) la progettazione di nuovi edifici a emissioni-zero nella fase d'uso (operativa);
- 5) il miglioramento della gestione energetica di tutti gli edifici;
- 6) la riduzione delle emissioni di anidride carbonica associate all'utilizzo di fonti energetiche per la climatizzazione, l'illuminazione e la produzione di acqua calda sanitaria degli edifici;
- 7) la diminuzione dei fabbisogni energetici degli elettrodomestici;
- 8) la riduzione della *Embodied Energy* e della *Embodied Carbon* degli edifici.

Con particolare riferimento al punto 8 della roadmap stabilita dalla GABC si evince la priorità di ridurre il contenuto di energia primaria, nonché le emissioni di anidride carbonica, associate ai materiali, ai componenti e agli impianti di un edificio e, laddove possibile, lungo il suo intero ciclo di vita.

Il passaggio da una valutazione onnicomprensiva degli impatti, che deriva da uno studio tradizionale LCA, a una che considera due categorie di effetti costituisce certamente una semplificazione, tuttavia è da intendere come un'opportunità per estendere a un numero più alto di utenti l'applicabilità di metodi e strumenti in grado di valutare il ciclo di vita di un edificio, come confermato da alcuni contributi scientifici (Zabalda, 2009; Moncaster, 2013; Pomponi, 2018).

L'International Energy Agency - Energy in Buildings and Communities Programme (IEA EBC) Annex 57 ha lavorato per circa 6 anni specificatamente alla definizione, alla determinazione e alla valutazione della *Embodied Energy and Carbon* degli edifici, coinvolgendo ricercatori provenienti da 15 paesi. L'Annex 57 condivide gli indicatori proposti da GABC associando alla fase di produzione, costruzione, manutenzione e dismissione di un edificio l'*Embodied Energy (EE - MJ)*, corrispondente al fabbisogno di risorse energetiche primarie e l'*Embodied Green House Gases emissions (EG – kg CO₂eq)*, anche definita *Embodied Carbon (EC)*, intesa come "bilancio pesato" delle emissioni che concorrono alla formazione dell'effetto serra. Il lavoro condotto da uno dei *subtask* si è rivolto a identificare le componenti che costituiscono

Figura 1.2.1 Relazione tra categorie di impatto *Embodied Energy* (EE) e *Embodied Carbon* (EC) nella fase di produzione dei materiali dell'edificio e relativa relazione tra risorse energetiche, di origine fossile e rinnovabili nella quantificazione dell'EE.

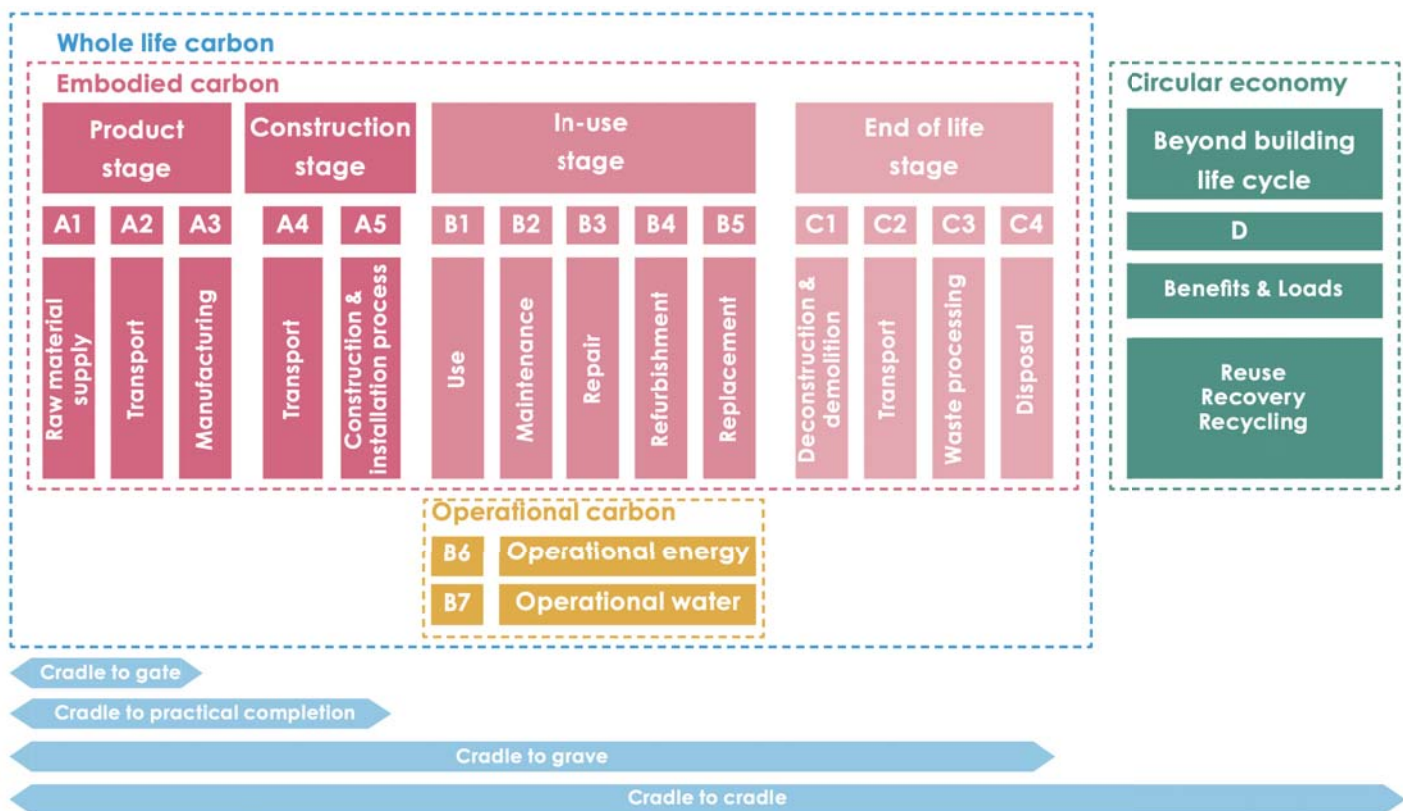


ciascun indicatore distinguendo tra: EE da fonti rinnovabili e EE da fonti non rinnovabili; EC associata ai processi produttivi, EC associata all'estrazione e alla trasformazione delle risorse energetiche non rinnovabili (Figura 1.2.1) ed EC stoccata nei materiali (prevalentemente a base legno).

Nel valutare il ciclo di vita di un edificio vi è poi da operare una distinzione tra EE e *Operational Energy* (OE) e tra EC e *Operational Carbon* (OC). Come stabilito dallo standard europeo EN15978: 2011, la EE e la EC misurano le prestazioni energetiche e ambientali (effetto serra) della maggior parte delle fasi del ciclo di vita di un edificio, con la sola eccezione della fase d'uso, ovvero quella operativa (Figura 1.2.2).

L'OE e l'OC costituiscono rispettivamente la quota di energia primaria e di emissioni di anidride carbonica equivalente correlate alla direttiva *Nearly Zero Energy Building* (Direttiva

Figura 1.2.2 Fasi del ciclo di vita contemplate dalla norma EN 15978:2011. A ogni fase è associato l'indicatore di *Embodied* (Energy e Carbon) e l'indicatore *Operational* (Energy e Carbon).



2010/31/UE); in particolare il valore di OE è da associare alle classi con cui si determina l'efficienza energetica di un manufatto edilizio.

Poiché EE e OE, così come EC e OC, condividono la stessa unità di misura (MJ; kWh – KgCO₂ eq.), attraverso un processo di normalizzazione - che tiene conto dei metri quadrati di superficie riscaldata (e/o di quella non riscaldata) e del numero di anni stimati di vita dell'edificio - è possibile sommare le diverse componenti al fine di determinare il bilancio di energia e delle emissioni di CO₂ dell'edificio (Giordano, Serra, 2017).

Ai fini della comprensione dell'importanza che stanno assumendo gli indicatori EE ed EC è utile citare la certificazione svizzera Minergie® A. Il quaderno SIA 2032: 2010 è il riferimento tecnico che determina le modalità di calcolo dell'EE e dell'EC, nonché stabilisce un limite sul contenuto di energia primaria (o grigia) di un edificio, in relazione alla destinazione d'uso. Elemento rilevante è la definizione di durata del ciclo di vita di un edificio (50 anni) e la metodologia di normalizzazione che classifica le prestazioni energetiche in relazione ai volumi dell'edificio, distinguendo in: valori di EE ed EC riferite ai volumi riscaldati; valori di EE ed EC riferiti ai volumi non riscaldati.

Nel complesso l'attuale sviluppo sia di carattere normativo, sebbene non ancora cogente, sia a livello di strategie di salvaguardia ambientale definite per il settore edilizio, dimostra la piena applicabilità di alcuni indicatori. In particolare si evince che per indicatori come EE ed EC la comprensione e la percezione da parte degli attori del processo edilizio è cresciuta (si veda la diffusione ormai decennale della certificazione Minergie®- A) e che stanno maturando competenze in grado di rendere applicabile la loro valutazione nel progetto (a partire da specifici approfondimenti previsti negli insegnamenti universitari, nei master e nei corsi di specializzazione legati agli ordini professionali).

1.2.3 EURECA un modello di calcolo per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio attraverso EE ed EC

EURECA – *Eco Utility for Reduction of Energy and Carbon* – è un modello di calcolo sviluppato a partire dal 2014 da un gruppo di ricerca del Dipartimento di Architettura e Design - DAD del Politecnico di Torino. L'obiettivo principale di EURECA è la determinazione di EE ed EC di un edificio prendendo in considerazione un numero consistente di fasi del ciclo di vita di un edificio: dall'estrazione delle materie prime fino alle previsioni degli scenari di smaltimento (riuso, riciclo, incenerimento con recupero energetico, dismissione in discarica).

Lo sviluppo del modello ha origine all'inizio degli anni 2000 con la messa a punto di un foglio di calcolo, in grado di determinare alcune prestazioni di un numero selezionato di fasi del ciclo di vita di un manufatto edilizio. Negli anni il foglio è stato via via migliorato, implementando gli algoritmi di calcolo di alcuni indicatori e realizzando una banca dati dei materiali da costruzione, in buona parte pubblicata nel testo *I Prodotti per l'Edilizia Sostenibile* (Giordano, 2010). A partire dal 2012 sono stati condotti studi che hanno in una prima fase consentito di ampliare il processo di valutazione dal singolo elemento tecnico all'intero edificio e, successivamente, portato alla messa a punto di un modello in grado di calcolare la EE e la EC, secondo un approccio coerente sia con la LCA sia con le attività condotte dai task dell'International Energy Agency. È infatti dalla correlazione tra LCA e l'Annex 57 che si è giunti alla selezione degli indicatori e alla distinzione tra OE e OC.

Poiché non vi sono nell'attuale sistema normativo requisiti obbligatori che richiedono la verifica degli indicatori EE ed EC, il modello propone il sistema di classificazione previsto dallo

standard svizzero Minergie® (classe di certificazione “A” ed “ECO”) in relazione a una vita utile stimata di 50 anni. Sempre in coerenza con i criteri fissati dalla normativa svizzera il calcolo della EE e della EC è suddiviso in relazione ai volumi dell’edificio (climatizzati e non climatizzati). EURECA nasce altresì per fornire un supporto decisionale al progettista che, attraverso un approccio integrato, si pone obiettivi di sostenibilità ambientale e gestione ottimale delle risorse. Può essere utilizzato fin dalle prime fasi dell’attività di progettazione ed è anche adatto a valutare gli impatti delle operazioni di retrofit tecnologico su edifici esistenti. EURECA è inoltre applicabile a differenti destinazioni d’uso, utilizzando le classi di certificazione ad esse associate, in analogia con quanto indicato nello standard Minergie®. Per la valutazione degli impatti il modello adotta una logica definita nella guida come “progressiva”, valutando EE ed EC a partire dai singoli materiali previsti in progetto, proseguendo con gli elementi tecnici (composti dai diversi materiali), fino ad arrivare a valutare l’impatto dell’intero edificio (considerato come somma di elementi tecnici e degli elementi impianto).

Il modello di calcolo si compone di sezioni che vanno compilate in modo sequenziale:

- 1) dati generali dell’edificio;
- 2) elementi tecnici (suddivisi in elementi che delimitano i volumi climatizzati dell’edificio e i volumi non riscaldati);
- 3) serramenti (anch’essi suddivisi in relazione al volume che delimitano);
- 4) impianti per la climatizzazione, la produzione di energia e di acqua calda sanitaria;
- 5) trasporti;
- 6) scenari di dismissione.

Ogni sezione è composta da parti da compilare manualmente, con i dati desumibili dalle caratteristiche geometriche e tecnologiche del progetto, altre, invece, che si auto compilano, attraverso algoritmi di calcolo (Gallina, Quaglio, 2019).

In particolare, per procedere con la valutazione è necessario definire:

- la destinazione d’uso dell’edificio (amministrativo, residenziale o scolastico);
- la durata del ciclo di vita stimata (convenzionalmente assunta in 50 anni);
- le informazioni dimensionali del progetto (superfici di partizioni e delle chiusure verticali, dimensioni degli elementi puntuali, ad esempio, pilastri e montanti, ecc.);
- la stratigrafia degli elementi tecnici, digitando, laddove non disponibile sul database del modello di calcolo, le informazioni sui valori di EE e di EC;
- le distanze in km e le tipologie di trasporto adottate per movimentare materiali e componenti dal luogo di produzione fuori opera al sito di produzione in opera (costruzione) e dal sito di dismissione ai centri di smaltimento, recupero e/o riciclaggio.

Infine, il modello restituisce all’utente un report sintetico dove sono riportati i seguenti risultati:

- 1) *Embodied Energy* totale dell’edificio [MJ], (iniziale, periodica, fine vita, trasporti);
- 2) *Embodied Carbon* totale dell’edificio [kgCO₂eq], (iniziale, periodica, fine vita, trasporti);
- 3) *Embodied Energy* annuale [kWh/m²/anno];
- 4) Indice di Rinnovabilità [%], espresso come rapporto fra EE da fonti rinnovabili e EE totale.

L’analisi del ciclo di vita dell’edificio PEI Maquina Verde

Un’importante opportunità di verifica dei contenuti e degli algoritmi di calcolo del modello EURECA è stata la casa PEI Maquina Verde (figura 1.2.3); l’edificio è stato progettato e costruito da una squadra di docenti, studenti, sponsor e alcuni professionisti, nell’ambito della competizione Internazionale *Solar Decathlon Latin America and Caribbean*, che si è svolta

in Colombia (Cali) nel dicembre 2019. La Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (prof. Carlos Alberto Hernández Correa) ha coordinato le diverse attività previste nel contest, con il contributo del Dipartimento Architettura e Design del Politecnico di Torino e il supporto nelle fasi iniziali della Oxford Brookes University.

Il Solar Decathlon è un concorso internazionale, suddiviso per continenti, istituito nel 2002 dall'US Department of Energy al quale partecipano team universitari chiamati a progettare e costruire edifici residenziali energeticamente efficienti, alimentati da energie rinnovabili ed ecocompatibili. A partire dal 2017 sono stati introdotti nuovi requisiti, strettamente connessi alla sostenibilità ambientale del progetto. In particolare la giuria della competizione tra i criteri di valutazione ne valuta uno denominato analisi del ciclo vita (*life cycle*).

Più in dettaglio il requisito si focalizza sull'impatto ambientale dell'abitazione, durante tutto il suo "ciclo di vita", richiedendo di verificare l'estrazione e la trasformazione dei materiali, il processo di costruzione, i cicli di sostituzione, fino alla dismissione finale. Il criterio introdotto nella competizione assume dunque come unità funzionale l'edificio (MJ - Kg CO₂ eq), normalizzato rispetto metro quadrato di superficie (m²) e in funzione di un ciclo di vita che varia in relazione alle caratteristiche dell'abitazione, che può essere temporanea o permanente (y). Per la casa PEI Maquina Verde si è fatto riferimento alla norma svizzera Minergie® - A precedentemente segnalata.



Figura 1.2.3 Immagine dell'edificio PEI Maquina Verde (Fonte: Lorenzo Savio).

Confini del sistema

Lo studio del ciclo di vita dell'edificio ha incluso le seguenti fasi:

- la produzione, che ha compreso la fornitura delle materie prime, il relativo trasporto (in base al valore medio ricavato dalle banca dati a disposizione del team di ricerca), la produzione del semilavorato o del prodotto finito;
- il trasporto, che ha compreso i processi di movimentazione dei materiali, dalla produzione fuori opera al sito di realizzazione;

- la riparazione e la sostituzione, che ha compreso il cambio di materiali e componenti di durata stimata inferiore ai 50 anni;
- il fine vita, che ha compreso il trasporto dei rifiuti e la valutazione di scenari di smaltimento finale.

Non sono state invece prese in considerazione le seguenti fasi:

- la costruzione, poiché si tratta di un edificio concepito per essere autocostruito, l'impatto energetico e ambientale è da addurre essenzialmente sulle risorse umane impiegate, pertanto difficilmente stimabile;
- l'uso, in quanto il fabbisogno energetico e le relative emissioni sono valutate attraverso altri strumenti di modellazione (EDGE);
- la demolizione, per le stesse ragioni riconducibili ai criteri di esclusione utilizzati per la fase di costruzione.

Un elemento peculiare l'analisi è che EURECA - conformemente alle indicazioni riportate nel citato standard EN 15978:2011 - prende in considerazione anche la fase post-demolizione. Si è pertanto proceduto alla quantificazione degli impatti che si potranno evitare attraverso processi virtuosi di recupero e riciclaggio. Gli impatti evitati possono essere considerati come benefici energetici e ambientali potenziali, che vanno oltre i confini del sistema (pertanto, nello studio sono stati considerati a parte) poiché si tratta di scenari, dopo 50 anni, che si immagina avverranno una volta terminata la vita utile dell'edificio.

Analisi di Inventario

I dati raccolti sono stati esaminati criticamente in termini di contenuti, origine e periodo di elaborazione, prima che si procedesse con l'inserimento nel modello di calcolo EURECA.

Una porzione consistente dei dati è da classificare come diretta, ovvero, sono stati ricavati da EPD fornite dalle aziende coinvolte nel progetto. Altri dati - classificati come dati indiretti - sono stati stimati utilizzando pubblicazioni scientifiche e banche dati (ad esempio: Ecoinvent). Ove possibile, è stato utilizzato un approccio di revisione comparativa tra più fonti, al fine di garantire una buona accuratezza dei dati.

Valutazione degli impatti e risultati

L'utilizzo del modello di calcolo EURECA ha consentito di determinare in forma prima disaggregata, poi aggregata, i valori di EE e di EC dell'edificio PEI Maquina Verde. I risultati conseguiti sono riassunti nella tabella 1.2.1.

La EE totale ammonta a 5.385,06 MJ/m². Tale valore corrisponde a circa 30 KWh/m²/anno, normalizzato su 50 anni di vita dell'edificio. Un valore che, pur riferito a un edificio costituito da un numero limitato di elementi tecnici, è inferiore, ma non di molto, a quello dell'*Operating Energy* (45 KWh/m²/anno) determinata sulla base dei fabbisogni di raffrescamento¹ ed elettrici. Il 53% dell'EE è ricondurre alla fase di produzione degli elementi tecnici; il 28% è legato al trasporto e il 19% alla sostituzione dei materiali (valore relativamente alto a causa della presenza di materiali naturali con durata limitata); è invece trascurabile l'impatto associato alla fase di demolizione.

La EC totale corrisponde a 262,54 KgCO₂eq/m². Nella valutazione, la percentuale più significativa di emissioni è attribuibile alla fase di trasporto (44%). Il 31% delle emissioni è associato al processo di sostituzione di materiali su un ciclo di vita di 50 anni, mentre il 25% è legato alla produzione. La produzione ha un valore inferiore rispetto al trasporto e alla EC ricorrente (associata ai cicli di sostituzione dei materiali). Ciò è dovuto ai materiali a base di legno previsti nell'edificio. Come conseguenza dei crediti di carbonio assorbiti durante la fase

di crescita della pianta le emissioni di CO₂ vengono assunte nel bilancio ambientale della fase di produzione con un valore negativo.

Per quanto attiene, invece, gli impatti evitati sono determinati i seguenti valori: EE 2.752,62 MJ/m²; EC 106,17 Kg/m². Tali valori sono relativamente importanti in quanto rappresentano un potenziale fabbisogno energetico evitato e una potenziale emissione di CO₂ evitata grazie a processi di riutilizzo e riciclaggio.

Il materiale con i più alti valori di EE e EC è il PVC (1.149, 72 MJ/m²). Il PVC, pur essendo un materiale ottenuto dall'estrazione di risorse non rinnovabili, ha la possibilità di essere riciclato (è stato stimato all'80%). La riciclabilità del PVC è potenzialmente elevata grazie al sistema di assemblaggio a secco previsto in progetto che ne facilita la rimozione.

È infine utile procedere all'interpretazione dei risultati conseguiti. Vi è innanzitutto da evidenziare che sebbene si tratti di indicatori fortemente correlati, l'intensità dell'impatto si distribuisce in modo differente. In particolare il trasporto dei materiali e dei componenti costituisce la principale causa in termini di effetto serra. Ciò ha portato a valutare differenti opzioni di conferimento, prevedendo di sostituire, laddove possibile, i trasporti su gomma con trasporti alternativi. Inoltre, i valori di EE e di EC dell'edificio PEI Maquina Verde sono stati influenzati da alcuni fattori, di seguito richiamati.

L'indice di riciclabilità dell'edificio è discreto (circa il 10%) per taluni aspetti un po' al di sotto delle attese; pur avendo fatto ricorso a un numero elevato di materiali di origine naturale: Palma Seje; legno e guadua, la massa (kg/m³) di alcuni altri materiali di origine sintetica corrisponde a oltre il 70% della massa totale dell'edificio (con particolare riferimento all'acciaio utilizzato per la struttura principale, ai serramenti e alla copertura in PVC).

Nel complesso tutti i materiali hanno potenzialità di recupero elevate. Acciaio e PVC, pur essendo caratterizzati da elevati valori di EE ed EC, hanno vantaggi in termini di riciclabilità: sulla base delle indicazioni fornite dalle aziende produttrici disponibili al recupero delle componenti principali, sono state assunte elevate percentuali di riciclabilità (fino all'80%). Tale tasso è possibile grazie all'utilizzo di soluzioni tecnologiche per lo più realizzate a secco che consentono un disassemblaggio facilitato e la conseguente identificazione e separazione di un elevato numero di materiali e componenti, al termine della competizione.

1.2.4 Conclusioni

Il lavoro di ricerca condotto dimostra che uno studio LCA riferito al ciclo di vita di un edificio è oggi possibile. Lo è certamente attraverso un numero semplificato di indicatori, lo è attraverso

¹ In considerazione delle caratteristiche climatiche del luogo, l'edificio non ha fabbisogni termici di riscaldamento.

Tabella 1.2.1 Sintesi della valutazione degli impatti: *Embodied Energy* (MJ) e *Embodied Carbon* (kgCO_{2eq}) per le diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio PEI Maquina Verde.

| WHOLE BUILDING | Embodied Energy | | Embodied Carbon | |
|----------------|----------------------------|---------------|--|------------------------------|
| | Total: 339.258,70 MJ | | Total: 16.559,83 kgCO _{2eq} | |
| | 5.285,96 MJ/m ² | | 262,54 kgCO _{2eq} /m ² | |
| | Initial (A1, A2, A3) | 180.003,39 MJ | Initial (A1, A2, A3) | 4.080,71 kgCO _{2eq} |
| | In use stage (B3, B4) | 63.096,00 MJ | In use stage (B3, B4) | 5.112,41 kgCO _{2eq} |
| | End of life (C3,C4) | 223,88 MJ | End of life (C3,C4) | 17,10 kgCO _{2eq} |
| | Transport (A4, C2) | 95.935,43 MJ | Transport (A4, C2) | 7.329,60 kgCO _{2eq} |

l'adozione di un certo numero di criteri di esclusione e di normalizzazione, lo è attraverso la delineazione di scenari potenziali che vanno oltre un approccio puramente deterministico nell'analisi. EURECA è un contenitore di algoritmi riferiti a un numero consistente di norme tecniche internazionali, uno strumento pensato per indirizzare il progettista e altri attori del processo edilizio, che non restituisce numeri meticolosamente precisi, ma valori in grado di evidenziare quali possono essere i processi o i materiali maggiormente critici nel progetto, dando la possibilità di definire alternative e di valutarne l'efficacia. EURECA non intende porsi in antitesi con gli strumenti di certificazione ambientale degli edifici, ne potrebbe diventare parte integrante, consentendo di rendere meno qualitative alcune verifiche e soprattutto privilegiando in questa fase storica categorie di impatto – come l'effetto serra – cui rivolgiamo tutti un'attenzione particolare. La decarbonizzazione del settore edilizio è ancora probabilmente lontana, la quantificazione dei fabbisogni energetici e della CO₂ di un numero crescente di fasi che caratterizza il processo edilizio pare invece alla nostra portata, così come l'identificazione di opportune azioni di compensazione.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare l'arch. Lorenzo Savio del Dipartimento di Architettura e Design, per il contributo fornito all'elaborazione dei dati, in particolare nel prezioso lavoro di coordinamento tra il gruppo di ricerca di Torino e il gruppo di ricerca di Bogotà.

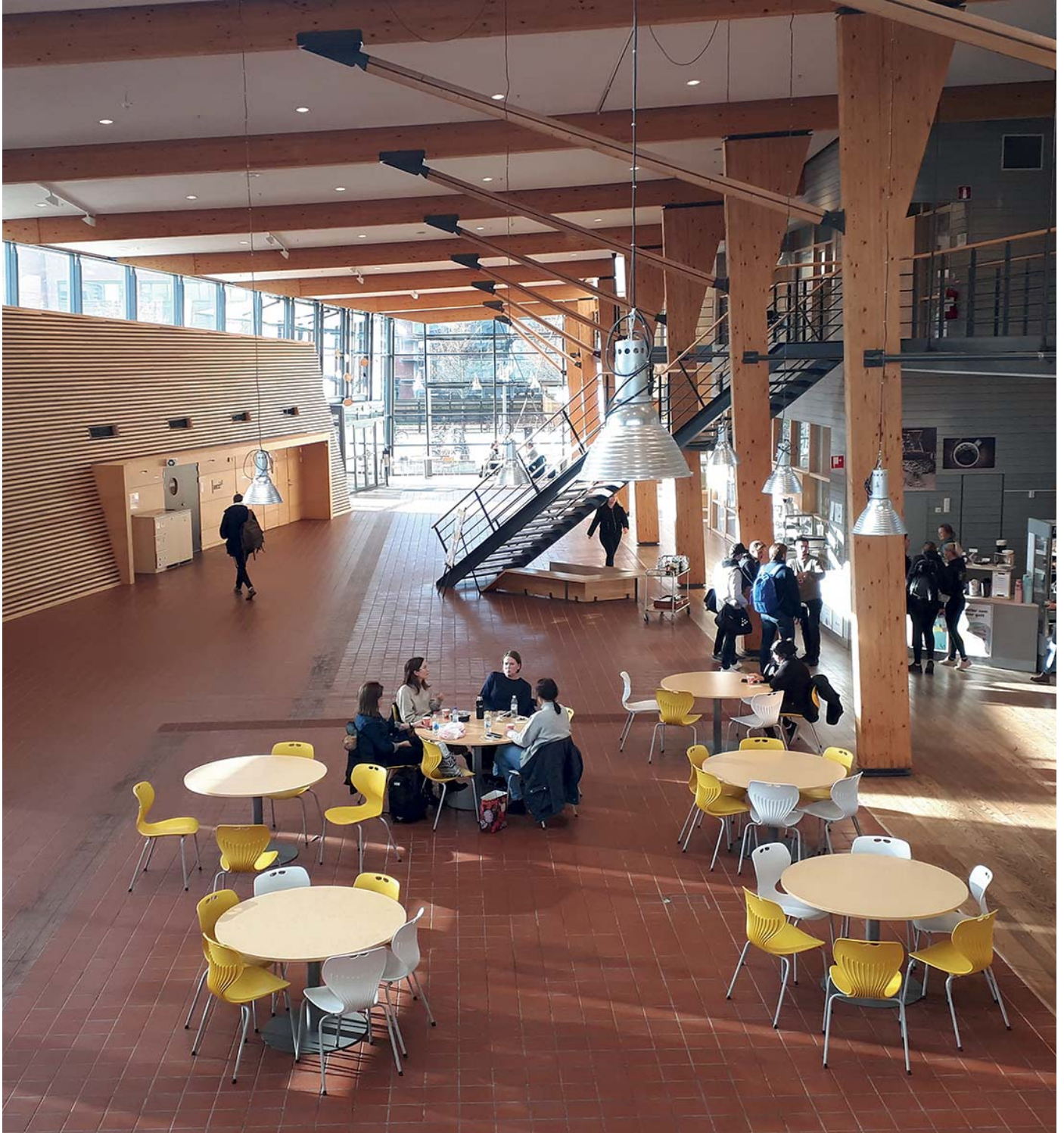
Un grazie particolare a Federica Gallina e Benedetta Quaglio per l'intenso lavoro di analisi delle informazioni e – soprattutto – per il costante supporto fornito nella definizione della metodologia di valutazione e nello sviluppo del modello di calcolo EURECA.

Bibliografia

- Benjamin D., 2017. *Embodied Energy and Design: Making Architecture Between Metrics and Narratives*, Columbia University GSAPP and Lars Müller Publishers.
- Direttiva 2010/31/UE (2010). *Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia*.
- EN 15978:2011. *Sustainability of Construction Works – Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method*, CEN – European Committee for Standardization.
- Engin A., Frances Y., 2010. *Zero Carbon Isn't Really Zero: Why Embodied Carbon in Materials Can't Be Ignored*, http://www.di.net/articles/archive/zero_carbon/
- Gallina F., Quaglio B., *EURECA: a model for parametric analysis and assessment of the environmental and energy impacts of buildings over their life cycle*. Master of Science thesis. tutors Giordano R., Savio L., Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Architettura Per Il Progetto Sostenibile.
- Giordano R., 2010. *I prodotti per l'edilizia sostenibile*, Sistemi Editoriali, Napoli.
- Giordano R., Serra V., Demaria E., Duzel A., 2017. "Embodied Energy Versus Operational Energy in a Nearly Zero Energy Building Case Study", *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 367-376.
- International Energy Agency, 2017. *Energy Technology Perspectives 2017*. IEA/OECD, Paris, <https://www.iea.org/etp>
- International Energy Agency, 2017. *Global Status Report 2017. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*, World Energy Statistics and Balances, IEA/OECD, Paris, <https://www.iea.org/statistics>
- International Energy Agency, 2019. *Global Energy and CO₂ Status Report 2018*, <https://www>.

eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf

- International Energy Agency in Buildings and Communities Programme, 2016. *Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57)*, http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_57_Results_Overview.pdf
- Jacobs J., 2016. *Flood Losses in Europe to Increase Fivefold by 2050*, <http://floodlist.com/europe/report-floods-europe-increase-fivefold-2050>).
- Moncaster A.M., Symons K.E., 2013. "A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards", *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 514-523.
- Pacheco-Torgal F., Faria J., Jalali S., 2013. "Embodied Energy versus Operational Energy. Showing the shortcomings of the energy performance building directive (EPBD)", *Materials Science Forum*, vol. 730, pp. 587-591.
- Pomponi F., De Wolf C., Moncaster A., (eds), 2018. *Embodied Carbon in Buildings: Measurement, Management and Mitigation*, Springer.
- SIA 2032, 2010. *Energia Grigia degli Edifici. Quaderno Tecnico. Società svizzera degli ingegneri e degli architetti*, <http://shop.sia.ch/Groups/>
- UNEP, 2020. *GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*, IEA, Paris.
- Zabalza Bribián I., Aranda Usón A., Scarpellini S., 2009. "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification", *Building and Environment*, vol. 44 (12), pp. 2510-2520.



1.3 Il contributo dei materiali verso la decarbonizzazione del ciclo di vita degli edifici

1.3.1 L'impatto ambientale degli edifici e i materiali *low-carbon*

Il cambiamento climatico rappresenta una delle maggiori sfide per la comunità internazionale. Il settore edilizio è responsabile del 19% delle emissioni globali di gas serra (Lucon et al., 2014), e in Europa la quota sale a 36% (Commissione Europea, 2008). La strategia europea mira a ridurre le emissioni di gas serra del 20% entro il 2020 (Direttiva 2012/27/EU) e dell'80% entro il 2050 (Commissione Europea, 2011). Il settore edilizio viene menzionato specialmente per le sue emissioni inquinanti in fase d'uso. A tal proposito, oltre alla Direttiva 2018/844/EU, seguiranno in futuro standard energetici sempre più elevati in funzione dell'Accordo di Parigi sul cambiamento climatico del 2015 (Andersson et al., 2018). Ad oggi la definizione di edificio ad elevate prestazioni energetiche varia in maniera sostanziale tra i paesi europei, così come gli indicatori prestazionali (Groezinger et al., 2014). La maggioranza dei paesi europei stabilisce un consumo minimo di energia primaria e solo pochi di essi considerano un livello inferiore di emissioni di CO₂ (Erhorn and Erhorn-Kluttig, 2015), mentre un numero ancora inferiore di paesi include l'energia inglobata nella definizione di edificio ad alte prestazioni. In Italia si definisce *Nearly-Zero Energy Building* (NZEB) "un edificio ad altissima prestazione energetica [...] in cui il fabbisogno energetico (molto basso o quasi nullo) è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in loco". Normativamente un edificio NZEB deve seguire gli obblighi definiti dal DM 26 giugno 2015 e dal Dlgs n. 28 del 3 marzo 2011. Nessuno dei due decreti, comunque, prevede la valutazione del consumo energetico in fase di produzione dei componenti edilizi. Si ricorda, inoltre, lo standard *Passive House*, che rappresenta un concetto di edificio ad elevate prestazioni energetiche di tipo conservativo, ossia volto ad ottimizzare la prestazione termica dell'involucro edilizio.

Tuttavia, secondo un approccio al ciclo di vita, non è soltanto necessario ridurre le emissioni di CO₂ in fase d'uso, ma durante tutte le fasi di vita dell'edificio. A tal proposito, il dibattito sugli impatti climatici del settore edilizio pone l'attenzione sul contributo che i prodotti a base di legno, per loro natura in grado di stoccare carbonio dall'atmosfera, possono offrire nella mitigazione del riscaldamento globale.

Nell'ultimo decennio, il consumo di prodotti a base di legno è aumentato globalmente (Ramage et al., 2017), con notevole successo dei prodotti ingegnerizzati. Ad esempio, il volume di produzione di *Cross Laminated Timber* (CLT) è aumentato di circa quattordici volte tra il 2000 e il 2015 (Brandner et al., 2016), mentre quello di *Laminated Veneer Lumber* (LVL) è quasi raddoppiato nello stesso periodo (Hakkarainen et al., 2019). In Italia, la costruzione di nuovi edifici con struttura in legno ha registrato una crescita rilevante, pari a circa il 7% tra 2006 e 2015, a fronte di un calo generale delle nuove costruzioni ad uso residenziale del 35% tra 2008 e 2016 (Federlegno Arredo, 2015). Il progressivo sviluppo delle norme tecniche delle costruzioni (Eurocodici) verso un approccio prestazionale ha certamente favorito la realizzazione di costruzioni in legno di grandi dimensioni (Ramage et al., 2017). Al tempo

Chiara Piccardo

Assistant professor, Faculty of Engineering Technology, Building Physics and Sustainable Design, Ghent and Aalst Technology Campuses, KU Leuven.
Email: chiara.piccardo@kuleuven.be

Adriano Magliocco

Professore ordinario di Tecnologia dell'architettura, presso l'Università degli studi di Genova, Dipartimento architettura e design - DAD.
Email: adriano.magliocco@unige.it

stesso, il ridotto peso delle strutture è determinante in alcuni interventi, come sopraelevazioni e riqualificazioni di edifici esistenti.

L'uso di prodotti a base di legno risulta anche particolarmente apprezzato per il suo ridotto impatto ambientale. Diversi studi, realizzati in diversi paesi, mostrano come i prodotti a base di legno, a confronto con altri materiali da costruzione, richiedano di norma meno energia e rilascino meno emissioni di CO₂ durante il loro ciclo di vita (Gustavsson et al., 2006; Gerilla et al., 2007; Upton et al., 2008; Doodoo et al., 2009; Blengini e Di Carlo, 2010; Bribián et al. 2011; Nässén et al. 2012; Tettey et al. 2014; Peñaloza et al. 2016; Kovacic et al. 2018; Pittau et al., 2018). Ciò è dovuto alla quantità di energia relativamente ridotta richiesta per la produzione di prodotti in legno e all'ottimizzazione del processo produttivo stesso, ad esempio sostituendo l'uso di combustibili fossili con quello di sottoprodotti (scarti di produzione) per la produzione dell'energia in stabilimento. Inoltre, i prodotti in legno sono in grado di stoccare temporaneamente il carbonio in precedenza sottratto all'atmosfera, attraverso il processo di fotosintesi degli alberi, e di rilasciarlo successivamente sotto forma di CO₂ durante i processi di combustione o di naturale decomposizione del legno, secondo un ciclo che è possibile definire *carbon neutral*.

Alcuni studi, inoltre, indagano i possibili benefici potenzialmente derivanti dalla sostituzione di materiali ad elevato tasso di emissioni di CO₂ con prodotti a base di legno funzionalmente equivalenti (*wood substitution*). Tali studi mirano a calcolare il fattore di sostituzione, ossia la quantità di emissioni di CO₂ potenzialmente ridotta per unità di carbonio stoccato nei prodotti in legno sostitutivi. Buchanan e Levine (1999) sono stati tra i primi a valutare tale fattore, confrontando versioni alternative di edifici realizzati rispettivamente in legno e in altri materiali, calcolando un fattore di sostituzione compreso tra 1,05 e 15 kg C / kg C, a seconda dei materiali da costruzione impiegati. Sathre e O'Connor (2010), così come Gustavsson et al. (2006), hanno anche osservato come il valore del fattore di sostituzione dipenda dalle condizioni al contorno dello studio, come il confine di sistema, i metodi di allocazione e gli scenari di fine vita considerati. Più recentemente, l'European Forest Institute ha rilasciato uno studio che individua un fattore medio di sostituzione pari a 1,3 kg C / kg C per materiali strutturali e 1,6 kg C / kg C per materiali non strutturali (Leskinen et al., 2018).

Sebbene la letteratura non sia concorde nel quantificare i benefici derivanti dall'uso di prodotti in legno in termini di riduzione delle emissioni di CO₂ (Berndes et al., 2016), questo tema di ricerca è importante al fine di stabilire uno standard di riferimento potenzialmente utile alle nuove politiche sulla decarbonizzazione degli edifici.

Ad oggi non esistono regolamentazioni cogenti in grado di incoraggiare l'uso di prodotti a base di legno in edilizia, anche se le certificazioni ambientali degli edifici (ad esempio, LEED e BREEAM) incentivano l'uso di materiali rinnovabili attraverso il loro sistema a punteggio (Piccardo et al., 2019a). Inoltre, si segnalano alcune iniziative locali, per lo più guidate da alcune città con obiettivi di *carbon neutrality* (ad esempio Copenaghen, Helsinki, Vancouver e Seattle), dove l'uso del legno come materiale da costruzione e come combustibile è esplicitamente menzionato nei rispettivi programmi. Un esempio significativo, e altrettanto controverso, è rappresentato dalla decisione della municipalità di Helsinki di imporre l'uso del materiale legno nelle nuove costruzioni del quartiere di Honkasuo. Tale decisione è stata legittimata dalla Corte Suprema finlandese nel 2015 in funzione del *Land Use and Building Act 132/1999* promulgato dal Ministero dell'Ambiente, secondo cui le municipalità sono autorizzate a supervisionare e approvare piani e progetti, inclusa la possibilità di introdurre vincoli progettuali (ad esempio, preferenze nell'uso di materiali specifici) nella regolamentazione delle zone urbane (Franzini et al., 2018).

Ad oggi, si contano trentanove interventi soggetti a simile decisione, in diverse città finlandesi. Il caso finlandese, sebbene rappresenti una condizione legislativa peculiare, evidenzia l'importanza di avviare un dibattito sull'uso sostenibile di prodotti a base di legno, al fine di informare future pratiche e politiche nel settore edilizio.

Nelle pagine seguenti si fornisce un esempio di ricerca volto ad esplorare i potenziali benefici ambientali derivanti dall'uso di prodotti a base di legno nell'ambito delle costruzioni. Sebbene l'oggetto di studio non appartenga al contesto italiano, tale ricerca offre un approccio metodologico replicabile e i risultati esposti possono contribuire ad incrementare la conoscenza per un uso sostenibile di prodotti a base di legno negli edifici.

1.3.2 L'analisi LCA nella valutazione dell'uso dei materiali negli edifici

L'analisi LCA è un utile strumento per valutare gli impatti ambientali degli edifici attraverso il loro ciclo di vita, offrendo una visione complessiva delle performance attuali e di quelle future, attraverso la definizione di possibili scenari. Qui si propone un esempio di analisi LCA sviluppata per confrontare l'impatto ambientale di diverse soluzioni di riqualificazione energetica, realizzate con diversi materiali da costruzione, incluso il legno. Infatti, è importante considerare non solo l'impatto ambientale degli edifici nel loro assetto iniziale, ma anche i possibili effetti derivanti dalle loro trasformazioni nel tempo, come gli interventi di riqualificazione energetica. Si pensi, ad esempio, che l'attuale patrimonio edilizio europeo costituirà circa il 70% del patrimonio edilizio nel 2050 (Visscher et al., 2016). Inoltre, circa il 50% degli attuali edifici residenziali è stato realizzato prima dell'entrata in vigore delle regolamentazioni nazionali in materia di efficienza energetica negli anni Settanta (Commissione Europea, 2019). Per questo motivo, si stima un incremento degli interventi di riqualificazione energetica nei prossimi anni. Sebbene i consumi energetici e le conseguenti emissioni di CO₂ risultino tuttora più importanti nella fase d'uso dell'edificio, l'innalzamento dello standard di efficienza energetica – sino al concetto di *Passive House*, *Nearly-Zero Energy Building*, o addirittura *Positive Energy Building* – ha determinato una progressiva attenzione verso le altre fasi del ciclo di vita degli edifici. In tal senso, i materiali da costruzione acquistano un ruolo sempre più importante nella mitigazione degli impatti ambientali.

Lo studio qui illustrato confronta il consumo di energia primaria e le emissioni di CO₂ derivanti da un intervento di riqualificazione energetica atto a raggiungere lo standard *Passive House* utilizzando diversi materiali per l'involucro edilizio. Lo studio si è servito dell'uso combinato di simulazione energetica in regime dinamico e metodologia LCA per valutare e confrontare le diverse opzioni materiche. La ricerca è stata svolta in collaborazione con il gruppo di ricerca SBER (Sustainable Built Environment Research group) della Linnaeus University (Svezia), con il supporto della fondazione C.M. Leric di Stoccolma e dell'Università degli Studi di Genova, e descritta in maniera estensiva in diverse pubblicazioni (Piccardo et al., 2019b; Piccardo et al., 2020).

Al fine di sviluppare l'analisi del ciclo di vita, è stato preso in considerazione, in qualità di caso studio, un edificio esistente con caratteristiche tipologiche e tecnologiche rappresentative del patrimonio edilizio (anno di costruzione 1974). L'analisi energetica è stata sviluppata sulla base dei dati climatici caratteristici del sito (Ronneby, Svezia) e dei dati operativi dell'edificio esistente. Per il progetto di riqualificazione energetica, è stato preso in considerazione lo standard *Passive House* promosso dal Passive House Institute (PHI) e valido in diversi paesi, con corrispondente consumo annuo di 30 kWh/m² (PH30) per edifici riqualificati.

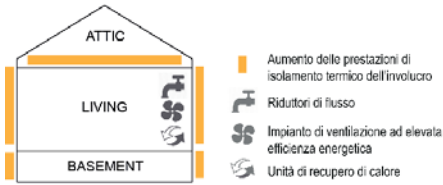


Figura 1.3.1 Schema delle misure di riqualificazione adottate.

Le misure di riqualificazione energetica previste hanno riguardato sia le soluzioni impiantistiche che l'involucro edilizio (Figura 1.3.1). La prima categoria di misure consiste nella sostituzione dell'impianto di ventilazione meccanica esistente con miglioramento delle prestazioni di efficienza energetica e aggiunta di unità per il recupero di calore, oltre alla introduzione di rubinetti con riduttore di flusso per il risparmio d'acqua. La seconda categoria di misure consiste nell'isolamento a cappotto dell'involucro (incluso il sottotetto) e nell'installazione di nuovi infissi con prestazioni termiche migliorate. Per il nuovo involucro edilizio, sono state progettate differenti opzioni materiche per isolamento termico, rivestimento di facciata e infissi (telaio). Le diverse opzioni materiche sono state combinate insieme per ottenere il numero massimo di versioni possibile. Inoltre, le diverse versioni sono state simulate con il software VIP Energy +, validato dall'International Energy Agency (IEA) tramite *Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method* (IEA BESTEST), al fine di ottenere involucri edilizi termicamente equivalenti.

Successivamente, il ciclo di vita delle diverse opzioni di riqualificazione energetica è stato analizzato secondo gli standard ISO 14040 e EN 15978, assumendo una vita utile del nuovo involucro edilizio di 50 anni. Il consumo di energia primaria e le emissioni di CO₂ per la fase di produzione, manutenzione e fine vita dei materiali, comprendente il riciclo dei rifiuti da demolizione, sono stati calcolati sulla base di Ecoinvent (Ecoinvent, 2012). La Figura 1.3.2 mostra i flussi di energia primaria ed emissioni di CO₂ presi in considerazione nello studio.

Le Figure 1.3.3 e 1.3.4 mostrano rispettivamente i risultati ottenuti in termini di energia primaria ed emissioni di CO₂, nelle diverse fasi del ciclo di vita. I risultati ottenuti per i due indicatori appaiono coerenti tra loro. La riqualificazione energetica che presenta più elevati consumi di energia primaria ed emissioni di CO₂ è l'opzione materica con isolamento termico in lana di vetro e rivestimento di facciata e telaio degli infissi entrambi in alluminio. Invece, la riqualificazione energetica a minori consumi di energia primaria ed emissioni di CO₂ è l'opzione che massimizza l'uso del legno nelle diverse parti dell'involucro edilizio. La fase d'uso consuma complessivamente 4692 MWh di energia primaria ed emette 663 tCO₂ di emissioni. L'energia primaria consumata nelle altre fasi del ciclo di vita equivale al 35-66% di quella consumata in fase d'uso, a seconda dell'opzione materica. La fase di produzione dell'involucro edilizio rappresenta la quota più rilevante di energia primaria ed emissioni di CO₂.



Figura 1.3.2 Flussi considerati nell'analisi LCA.

Tuttavia, anche la fase di manutenzione può influire in maniera significativa sul risultato finale, specialmente nel caso di materiali impiegati in esterno e soggetti alle intemperie, come i rivestimenti di facciata. Il riciclo dei rifiuti da costruzione e da demolizione a fine vita consente di ottenere benefici in termini di energia primaria risparmiata e emissioni di CO₂ evitate. Tali benefici sono stati calcolati ipotizzando che: i rifiuti combustibili, come XPS e legno, siano destinati a termovalorizzazione, sostituendo fonti fossili nella produzione di energia elettrica; i rifiuti riciclabili, come alluminio, lana di roccia, lana di vetro e vetro, vadano a sostituire materie prime vergini nei processi produttivi; altri rifiuti, come laterizio, siano utilizzati in forma di aggregati come sottofondo stradale. I benefici derivanti dal recupero dei rifiuti rappresentano rispettivamente fino al 20 e 23% dell'energia primaria e delle emissioni di CO₂ associate alla fase di produzione.

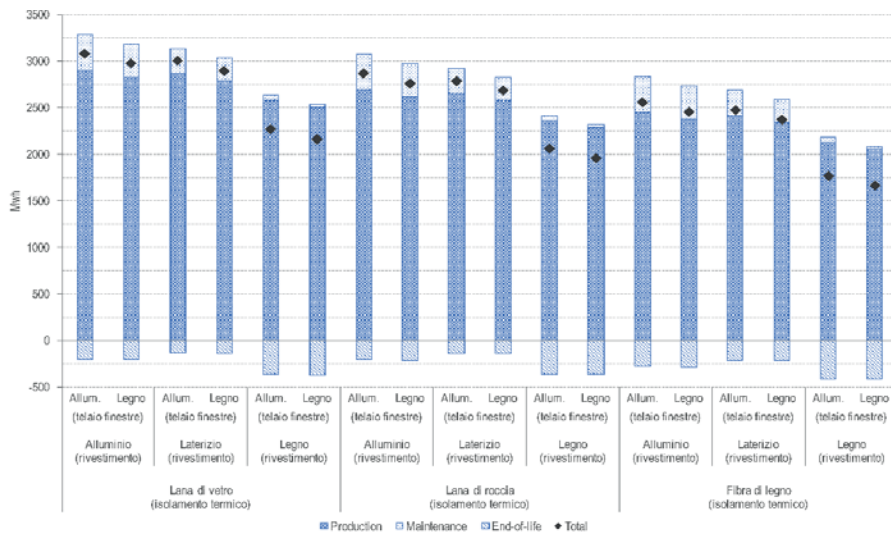


Figura 1.3.3 Energia primaria (MWh) per le fasi di produzione, manutenzione e fine vita (esclusa la fase d'uso) per diverse opzioni materiche.

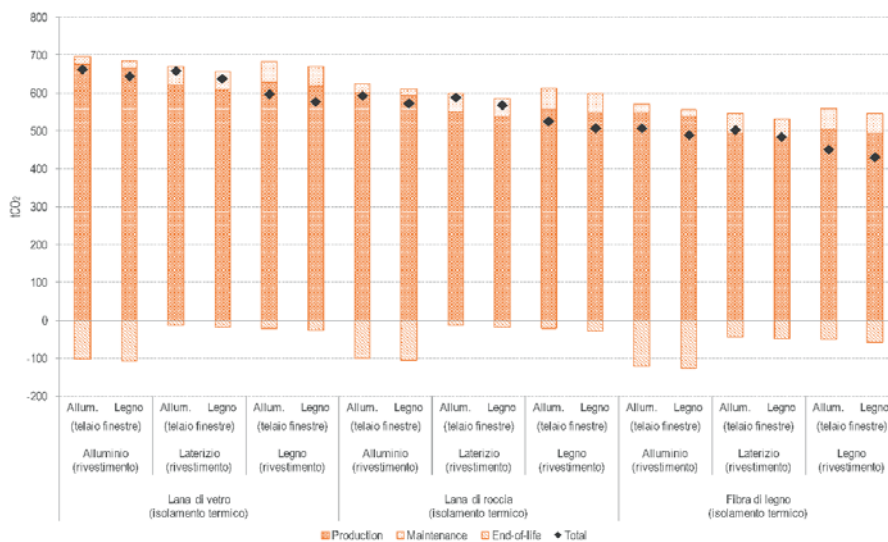


Figura 1.3.4 Emissioni di CO₂ (tCO₂) per le fasi di produzione, manutenzione e fine vita (esclusa la fase d'uso) per diverse opzioni materiche.

Si conclude che, analizzando l'intero ciclo di vita, la scelta dei materiali dell'involucro edilizio può influire in maniera significativa sul consumo di energia primaria e sulle emissioni di CO₂. Inoltre, massimizzare l'uso del legno può ridurre fino al 22% l'energia primaria e le emissioni di CO₂ totali.

1.3.3 Criteri Ambientali Minimi, l'approccio italiano alla sostenibilità ambientale di prodotti e servizi nel settore delle costruzioni

Relativamente al necessario passaggio dalla semplice valutazione delle prestazioni energetiche in fase di esercizio ad una più ampia valutazione della sostenibilità delle opere edilizie, l'Italia sembra puntare sui cosiddetti Criteri Ambientali Minimi (CAM). I CAM sono requisiti ambientali definiti per le diverse fasi del processo di acquisto della pubblica amministrazione volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita, tenuto in dovuto conto della disponibilità di mercato. Con il Decreto 11 ottobre 2017 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici" si è cercato di mettere a sistema diversi disposti legislativi, tra i quali la legge 27 dicembre 2006 n. 296 "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (legge finanziaria 2007)", e in particolare i commi 1126 e 1127, dell'art. 1 che disciplinano la predisposizione di un "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione" (PAN GPP), al fine di integrare le esigenze di sostenibilità ambientale nelle procedure d'acquisto di beni e servizi delle amministrazioni competenti sulla base di criteri e per categorie merceologiche individuati in modo specifico. In particolare il Decreto in oggetto, costituito da un unico articolo, al comma 1 rimanda all'allegato così definito "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della Pubblica amministrazione – ovvero - Piano d'azione nazionale sul Green Public Procurement (PANGPP)" definendo l'allegato come parte del citato Piano d'Azione. In Premessa si precisa che il documento tiene conto di quanto proposto in diverse Comunicazioni della Commissione Europea adottate dal Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea: COM (2008) 397 "Piano d'azione su produzione e consumo sostenibili e politica industriale sostenibile"; COM (2008) 400 "Appalti pubblici per un ambiente migliore"; COM (2015) 615 "L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare". In particolare, al punto 2.4.2.4 "Sostenibilità e legalità del legno", ci si preoccupa della sostenibilità e legalità dell'impiego del legno. Si recita infatti che «per materiali e i prodotti costituiti di legno o in materiale a base di legno, o contenenti elementi di origine legnosa, il materiale deve provenire da boschi/foreste gestiti in maniera sostenibile/responsabile o essere costituito da legno riciclato o un insieme dei due». Si chiede al progettista di scegliere prodotti che consentano di rispondere al criterio di sostenibilità e legalità della materia prima e all'appaltatore di accertarsi della rispondenza al criterio tramite documentazione che ne provi l'origine sostenibile e/o responsabile, una certificazione di prodotto, che garantisca il controllo della "catena di custodia" in relazione alla provenienza legale della materia prima legnosa e da foreste gestite in maniera sostenibile/responsabile; segue un elenco di possibili certificazioni (comunque ben note agli addetti ai lavori, quali quella del Forest Stewardship Council - FSC).

Possiamo leggere queste indicazioni secondo una accezione negativa – nulla si dice sul miglior profilo ambientale del legno e anzi si legge tra le righe la probabilità che il legname da

costruzione possa provenire da attività non gestite secondo corrette procedure silvicolture – oppure positiva – si dà per scontato che il legno sia ormai un materiale da costruzione, anche nel nostro paese, impiegabile al pari di tutti gli altri. Anche la prima riga di testo di cui al punto 1.2 “Indicazioni generali per la stazione appaltante” della suddetta premessa «l'utilizzazione dei CAM definiti in questo documento consente alla stazione appaltante di ridurre gli impatti ambientali degli interventi di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione degli edifici, considerati in un'ottica di ciclo di vita» può avere due interpretazioni, se riferiti al legno: negativa, poiché induce a pensare che l'uso del legno costituisca un impatto ambientale, positiva perché introduce il concetto di ciclo di vita in edilizia a livello normativo.

Con i CAM, come già avvenuto per i consumi energetici nel settore civile, si tenta di coniugare obiettivi di riduzione degli impatti ambientali – ancora in maniera molto embrionale – con obiettivi di sviluppo economico secondo i principi dell'economia circolare. Se dal punto citato non sembra che ci sia alcuna indicazione che individui l'uso del legno come “più sostenibile” rispetto agli altri materiali da costruzione, leggendo tra le righe possiamo in realtà individuare altri punti che potrebbero favorirne l'impiego. Nella stessa premessa si suggerisce la possibilità di utilizzare i sistemi di valutazione ambientale degli edifici (LEED, BREEAM ecc.) per integrare l'uso dei CAM con indicazioni operative più specifiche; come si è detto nei paragrafi precedenti spesso questi sistemi premiano l'uso del legno per il suo profilo ambientale. Inoltre, un implicito ruolo delle strutture a secco, quindi anche in materiale legno, è deducibile dal capitolo 2.4.1 “Criteri comuni a tutti i componenti edilizi”, 2.4.1.1 “Disassemblabilità” ove si chiede che «almeno il 50% peso/peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati, escludendo gli impianti, deve essere sottoponibile, a fine vita, a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile». Infine al capitolo 2.6 “Criteri di aggiudicazione (criteri premianti)” il paragrafo 2.6.4 “Materiali rinnovabili” prevede che la stazione appaltante definisca un punteggio premiante per l'utilizzo di materiali da costruzione derivati da materie prime rinnovabili (secondo la norma UNI EN ISO 14021:2016 cioè composti da biomasse provenienti da una fonte vivente e che può essere continuamente reintegrata) per almeno il 20% in peso sul totale dell'edificio escluse le strutture portanti. E questo non può che essere un materiale a base legno.

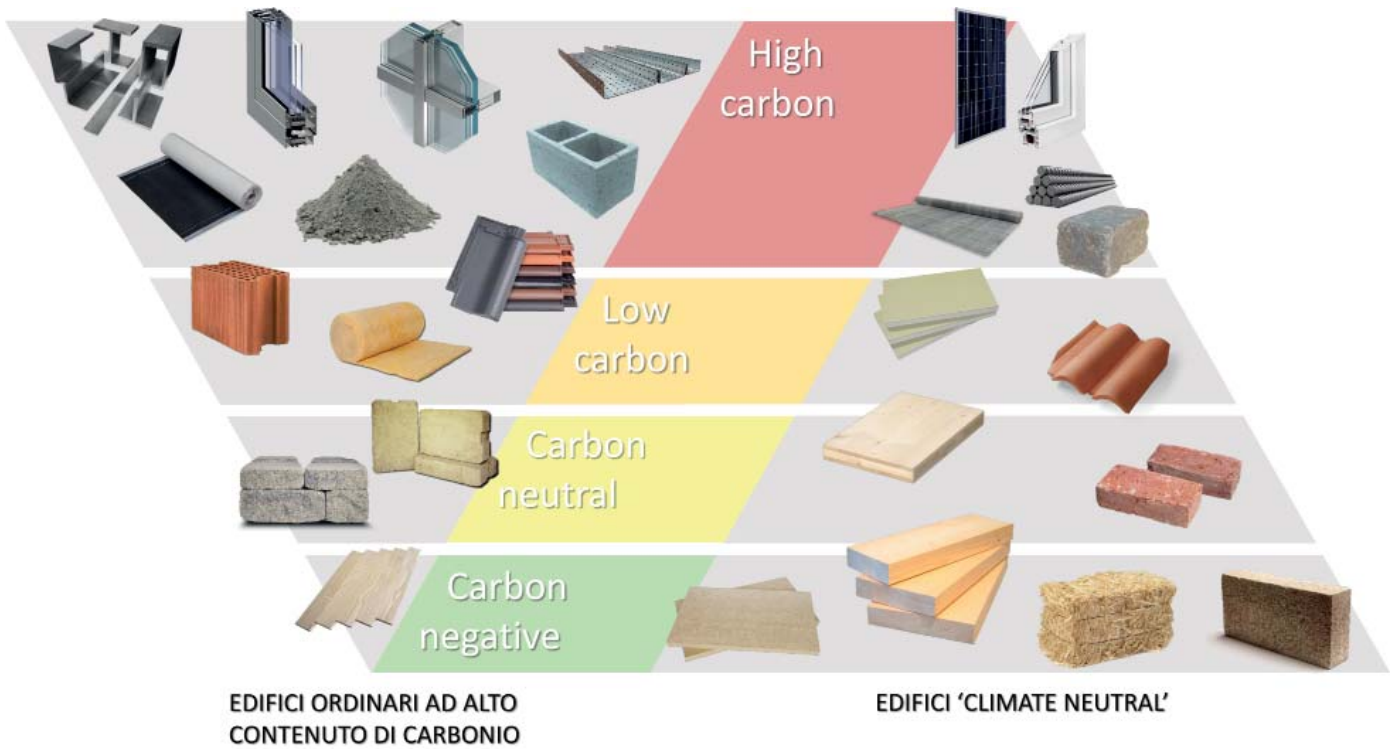
I Criteri Ambientali Minimi rappresentano, dunque, un importante documento di riferimento per incentivare l'uso di materiali sostenibili e per guidare le future scelte verso obiettivi di interesse comune, come la decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Tuttavia, è indispensabile continuare ad informare le politiche e gli strumenti che possono permetterne l'attuazione di tali obiettivi. In particolare, l'analisi LCA applicata ai materiali edilizi e al loro ruolo nel complesso sistema edificio rappresenta un approccio indispensabile per comprendere le dinamiche che ne influenzano gli impatti o i potenziali benefici nel presente e secondo scenari futuri.

Bibliografia

- Andersson M., Barkander J., Kono J., Ostermeyer Y., 2018. “Abatement cost of embodied emissions of a residential building in Sweden”, *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 595-604.
- Berndes G., Abt B., Asikainen A., Cowie A., Dale V., Egnell G., Lindner M., Marelli L., Paré D., Pingoud K., Yeh S., 2016. *Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation*, European Forest Institute, <https://www.efi.int>.
- Blengini G.A., Di Carlo T., 2010. “The changing role of life cycle phases, subsystems and

- materials in the LCA of low energy buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 42, n. 6, pp. 869-880.
- Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A., 2016. “Cross laminated timber (CLT): overview and development”, *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74 (3), pp. 331–351.
- Bribián I.Z., Capilla A.V., Usón A.A., 2011. “Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential”, *Building and Environment*, vol. 46 (5), pp. 1133-1140.
- Buchanan A., Levine S.B., 1999. “Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions”, *Environmental Science & Policy*, vol. 2 (6), pp. 427-437.
- Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.
- Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R., 2009. “Carbon implications of end-of-life management of building materials. Resources”, *Conservation and Recycling*, vol. 53, pp. 276–286.
- Erhorn H., Erhorn-Kluttig H., 2015. “Towards 2020 Nearly Zero-Energy Buildings. Overview and Outcomes”, in Maldonado E. (ed), *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Featuring Country Reports*. Adene, Lisbon.
- Commissione Europea, 2008. *Energy efficiency: delivering the 20% target*. COM (2008). 772.
- Commissione Europea, 2011. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM (2011). 112.
- Commissione Europea, 2019. *EU Buildings Factsheets*, <https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-factsheets>
- Federlegno Arredo, 2015. *Rapporto case ed edifici in legno*. Federlegno Arredo, <https://www.federlegnoarredo.it>
- Franzini F., Toivonen R., Toppinen A., 2018. “Why Not Wood? Benefits and Barriers of Wood as a Multistory Construction Material: Perceptions of Municipal Civil Servants from Finland”, *Buildings*, vol. 8, n. 159, pp. 1-15.
- Gerilla G.P., Teknomo K., Hokao K., 2007. “An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction”, *Building and Environment*, vol. 42 (7), pp. 2778-2784.
- Groezinger J., Boermans T., John A., Seehusen J., Wehringer F., Scherberich M., 2014. *Overview of Member States information on NZEBs*. Ecofys, <https://ec.europa.eu/energy>
- Gustavsson L., Pingoud K., Sathre R., 2006. “CO² balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11 (3), pp. 667–691.
- Hakkarainen J., Linkosalmi L., Huovinen A., Vares S., Häkkinen T., Veikkola M., 2019. *LVL Handbook*. Federation of the Finnish Woodworking Industries, Helsinki.
- Kovacic I., Reisinger J., Honic M., 2018. “Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82 (2), pp. 1774-1786.
- Leskinen P., Cardellini G., González-García S., Hurmekoski E., Sathre R., Seppälä J., Smyth C., Stern T., Verkerk P.J., 2018. *Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation*. From Science to Policy 7. European Forest Institute, <https://www.efi.int>
- Lucon O., Ürge-Vorsatz D., Zain Ahmed A., Akbar, H., Bertoldi P., Cabeza L.F., Eyre N., Gadgil A., Harvey L.D.D., Jiang Y., Liphoto E., Mirasgedis S., Murakami S., Parikh J., Pyke C., Vilariño M.V., 2014. “Buildings”, in: Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner

- S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C. (eds), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Nässén J., Hedenus F., Karlsson S., Holmberg J., 2012. "Concrete vs. wood in buildings. An energy system approach", *Building and Environment*, vol. 51, pp. 361-369.
- Peñaloza D., Erlandsson M., Falk A., 2016. "Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings", *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 219-226.
- Piccardo C., Alam A., Hughes M., 2019. "The potential of wood in sustainable residential buildings: prospects in green building certifications", in: *11th Annual Symposium of Architectural Research*, Tampere, Finland, 3-4 Oct
- Piccardo C., Dadoo A., Gustavsson L., Tetley U.Y.A., 2019cb "Energy and climate balance of building materials used in a building envelope renovation", in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225 (012045). BAMB CIRCPATH: Buildings as Material Banks - A Pathway for a Circular Future, Brussels, Belgium, 5-7 Feb.
- Piccardo C., Dadoo A., Gustavsson L., Tetley U.Y.A., 2020. "Retrofitting with different building materials: life-cycle primary energy implications", *Energy*, vol. 192, 116648.
- Pittau F., Krause F., Lumia G., Habert G., 2018. "Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls", *Building and Environment*, vol. 129, pp. 117-129.
- Ramage M.H., Burrige 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.F., Scherman O., 2017. "The wood from the trees: The use of timber in construction", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 333-359.
- Sathre R., O'Connor J., 2010. "Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution", *Environmental Science & Policy*, vol. 13, pp. 104-114.
- Tetley U.Y.A., Dadoo A., Gustavsson L., 2014. "Effects of different insulation materials on primary energy and CO₂ emission of a multi-storey residential building", *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 369-377.
- Upton B., Miner R., Spinney M., Heath L.S., 2008. "The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States", *Biomass and Bioenergy*, vol. 32 (1), pp. 1-10.



1.4 Il carbon budget per l'edilizia

L'emissione di gas a effetto serra nell'atmosfera dovuta alla crescente attività antropica ha cominciato a crescere esponenzialmente a seguito della rivoluzione industriale, raggiungendo negli ultimi decenni livelli allarmanti. Nell'ultimo secolo la popolazione mondiale è passata da 1.5 a 6.1 miliardi di persone. Secondo le stime dell'ONU, oggi ci sono oltre 7 miliardi di persone sulla terra (Roser and Ortiz-Ospina, 2016), e tale crescita complessiva è accompagnata da una costante transizione della popolazione dalle aree rurali a quelle urbane. Oggigiorno, oltre il 55% della popolazione mondiale vive nelle aree urbane e si prevede che questo numero aumenterà al 68% entro il 2050 (Swilling et al., 2018). Di conseguenza, l'aumento continuo della popolazione e dei livelli di benessere in molte regioni del mondo in via di sviluppo rischiano di portare ad un consumo sempre maggiore di risorse, con il conseguente aumento della domanda di energia e di combustibili fossili, oltre a generare una insostenibile quantità di rifiuti (Dutil et al., 2011). Attualmente, le emissioni fossili del settore edilizia e costruzioni rappresentano circa il 39% delle emissioni totali (REN21, 2018). Come mostrato in Figura 1.4.1, queste si suddividono in emissioni indirette, dovute al consumo di energia elettrica, ed emissioni dirette, provenienti dalla combustione di combustibili fossili per il riscaldamento degli edifici. A queste si aggiunge il contributo dell'industria delle costruzioni, con le relative emissioni dirette generate dalla produzione dei materiali da costruzione e la messa in opera degli edifici e indirette dovute al riscaldamento degli spazi di lavoro e al consumo di energia elettrica.

Il rischio di aumento di 1.5°C della temperatura media globale è concreto e secondo diversi studi può avvenire già entro un decennio se non si inverte velocemente la rotta e non si riducono drasticamente le emissioni fossili (Zhou, 2018). Un recente studio preliminare condotto dal Centro Nazionale Francese per la Ricerca Scientifica (CNRS) dimostra che il rischio di superamento di 7°C dei livelli preindustriali entro il 2100 è probabile se non riduciamo le emissioni e non investiamo sulla transizione energetica, con conseguenze devastanti per il clima e gli ecosistemi del pianeta ("Nouvelles simulations du climat : vers un réchauffement plus fort que prévu," n.d.).

Alla Conferenza delle Parti (COP21) di Parigi nel dicembre 2015, tenutasi in concomitanza del Sustainable Innovation Forum (SIF 2015), le parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) hanno raggiunto un accordo storico per combattere i cambiamenti climatici e accelerare e intensificare le azioni e gli investimenti necessari per una vita sostenibile a basse emissioni di carbonio. L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha sviluppato modelli climatici che dimostrano che se continuiamo ad utilizzare le risorse nello stesso modo di oggi e quindi ad emettere un alto valore di gas serra, ci sarà un aumento della temperatura da 1.4°C a 5.4°C entro la fine del 2100 (Latake and Pawar, 2015). L'aumento della temperatura sulla superficie terrestre ha un impatto climatico che influenza direttamente la vita dell'uomo in vari campi: economia, agricoltura, sistemi acquatici, ciclo idrologico, ecc. Per combattere la prospettiva di un forte riscaldamento

Francesco Pittau

Ricercatore di Produzione Edilizia, presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e ingegneria delle costruzioni ABC.

Email: francesco.pittau@polimi.it

Olga Beatrice Carcassi

Assegnista di ricerca di Produzione Edilizia, presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e ingegneria delle costruzioni ABC.

Email: olgabeatrice.carcassi@polimi.it

Alessia Medici

Ingegnere civile presso Emch+Berger AG Zürich.

Email: alessia.medici@emchberger.ch

Giuliana Iannaccone

Professore Associato di Architettura Tecnica presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e ingegneria delle costruzioni ABC.

Email: giuliana.iannaccone@polimi.it

Guillaume Habert

Professore Associato presso il Politecnico Federale di Zurigo (ETH), Chair of Sustainable Construction, D-BAUG.

Email: habert@ibi.baug.ethz.ch

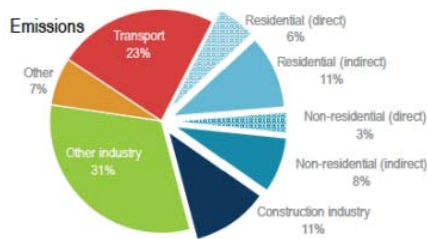


Figura 1.4.1 Contributo dei diversi settori sulle emissioni globali, 2017 (REN21, 2018).

globale, sono stati creati diversi scenari (Prather et al., 2012); essi rappresentano il valore massimo di CO₂-eq che può essere emesso nei prossimi anni con una probabilità del 66% di raggiungimento. Il Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 è il nome di uno dei casi analizzati che considerano un riscaldamento globale massimo tra 1.5 e 2°C entro la fine del 2100 (Isaac et al., 2011). Secondo il rapporto e l'accordo di Parigi, il *Carbon budget* per lo scenario RCP 2.6, equivale a circa 800 Gt di CO₂-eq dal 2016 e dovrebbe essere preservato almeno fino al 2100 per completare la transizione energetica. Purtroppo, i diversi scenari recentemente aggiornati dall'IPCC (IPCC, 2018) mostrano come sia estremamente improbabile riuscire ad azzerare le emissioni fossili entro il 2100 e tale budget potrebbe essere esaurito già prima del 2050. Pertanto, l'unica possibilità è quella di investire sulla decarbonizzazione e sviluppare in parallelo tecnologie capaci di riassorbire la CO₂ emessa in passato e stoccarla permanentemente nella biosfera (*Carbon Capture and Storage – CCS*). Le incertezze tuttavia sull'efficacia di tali sistemi nel lungo periodo e l'enorme costo economico per la loro implementazione sono tuttavia al momento al centro di un acceso dibattito all'interno della comunità scientifica (Smith et al., 2015).

1.4.1. Il carbon budget per l'edilizia

Nei Paesi occidentali, l'uso dell'energia nelle abitazioni è dominato dal riscaldamento e i principali sforzi politici sono attualmente orientati a ridurre drasticamente la domanda di energia per riscaldamento degli edifici. Al contrario, nei paesi in via di sviluppo nel sud del mondo, l'energia per il riscaldamento/raffreddamento degli edifici è relativamente marginale

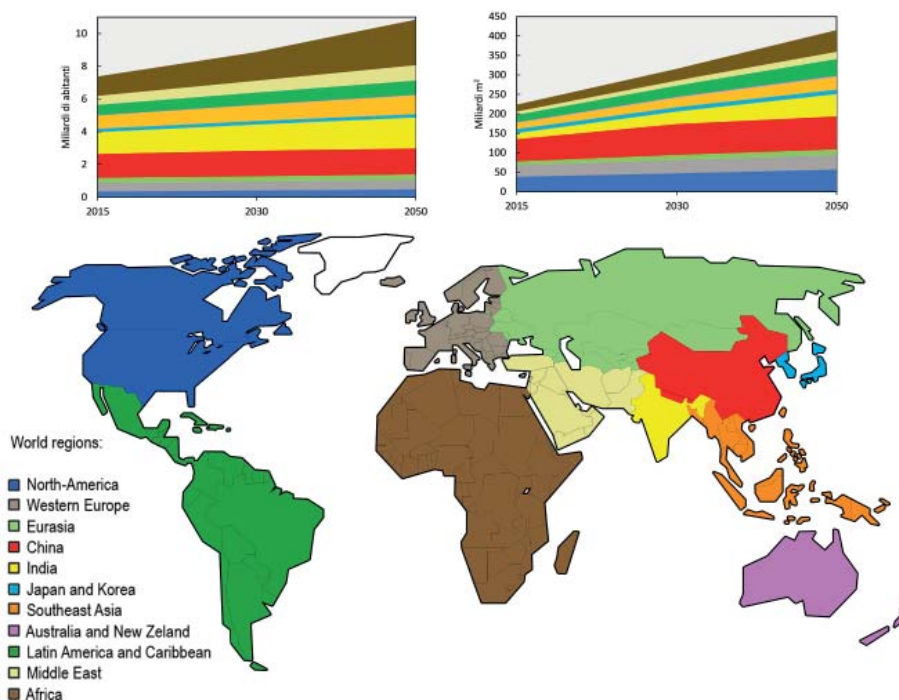


Figura 1.4.2 A sinistra, variazione della popolazione nel periodo 2015-2050, divisa per macroregione; a destra, crescita dell'area edificabile nel periodo 2015-2050, divisa per macroregione (Report, 2016).

rispetto alla quota richiesta per la produzione dei materiali da costruzione (chiamata anche “energia grigia”). Nel 2050 è stato stimato un aumento colossale della popolazione, fino a quasi 11 miliardi, e, come mostrato in Figura 1.4.2, la maggior parte della crescita è prevista nell’emisfero australe e area sub-equatoriale, soprattutto in Africa, India e Sud-Est asiatico. Nella maggior parte di questi Paesi si prevede anche un aumento dei livelli di ricchezza, con una crescente domanda di nuove case e infrastrutture necessarie a coprire il deficit abitativo. Pertanto, il fabbisogno energetico dei Paesi che necessitano di sviluppare le loro economie e fornire materiali per nuovi edifici e infrastrutture rischia di dominare le emissioni globali del settore edilizio e di rallentare la transizione verso una società a zero emissioni. È necessario pertanto definire un *carbon budget* per l’edilizia e le attività legate al settore delle costruzioni, in modo da limitare le emissioni in ciascuna macro-regione e non sfiorare a livello planetario il budget a disposizione. Tale stima è possibile tramite un approccio *top-down*, ottenendo così la quantità massima di CO₂-eq che può essere rilasciata da ciascun edificio nel periodo di transizione (Medici, 2019). Le undici macro-regioni analizzate, suddivise come in Figura 1.4.2, e i relativi *carbon budget* disponibili per le nuove costruzioni, possono essere analizzati secondo due diversi scenari. Il primo, rappresentato con la lettera A, si basa sul calcolo del budget in funzione unicamente del numero di edifici e il loro volume che devono essere costruiti nei prossimi 30 anni per supportare l’aumento della popolazione nelle varie aree geografiche. Tale scenario non considera pertanto il contributo passato dei Paesi occidentali sulle emissioni atmosferiche (altrimenti chiamato *carbon debit*). Il secondo scenario, rappresentato con la lettera B, tiene invece conto, oltre alla necessità di costruire nuovi edifici, del debito sulle emissioni gas serra che i Paesi economicamente sviluppati hanno accumulato negli anni passati, dal 1975 in poi, mentre premia, con un budget extra, i Paesi che non hanno contribuito alle emissioni attraverso dei *carbon credits* proporzionali a quanto ciascuna quota è inferiore rispetto alla media mondiale. Considerando la quota di nuove costruzioni e il contributo passato di ogni macro-regione al cambiamento climatico, il *carbon budget* delle costruzioni può essere definito per ogni macroregione e suddiviso per m² di superficie lorda di pavimento, come mostrato nella Figura 1.4.3.

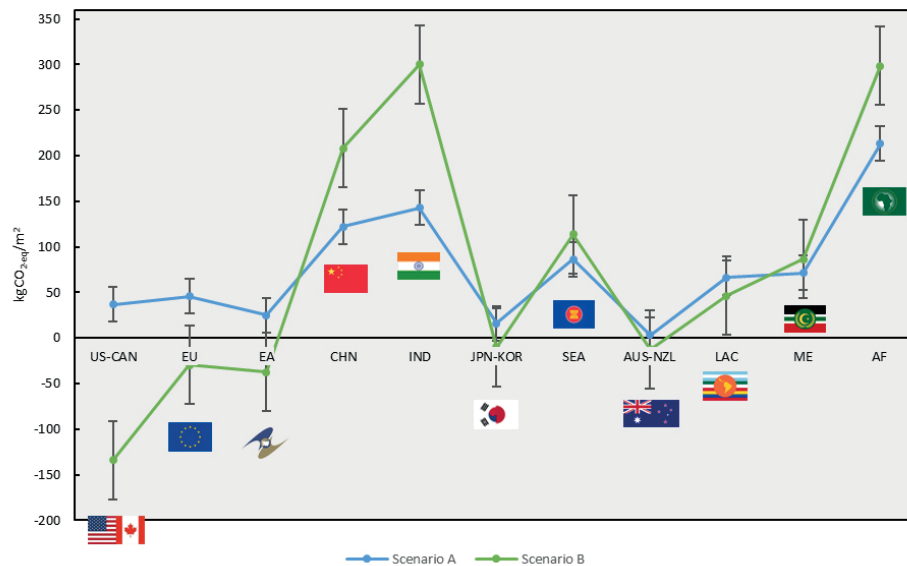


Figura 1.4.3 *Carbon budget* per l’edilizia e costruzioni in ciascuna macro-regione, secondo i due scenari di riferimento. Scenario A rappresenta la quota di emissione ammissibile per m² di superficie costruita nel caso in cui i debiti/crediti di carbonio passati non vengano conteggiati; Scenario B rappresenta la quota di emissione ammissibile nel caso in cui il contributo delle emissioni storiche venga considerato. Le macro-regioni sono suddivise in: Nord America (US-CAN), Europa occidentale (EU), Eurasia (EA), Cina (CHN), India (IND), Giappone e Corea (JPN-KOR), Asia sudorientale (SEA), Australia e Nuova Zelanda (AUS-NZL), America Latina e Caraibi (LAC), Medio Oriente (ME) e Africa (AF). (Medici, 2019)

Se si tiene conto del contributo delle emissioni del passato ai cambiamenti climatici (scenario B), i Paesi occidentali non hanno un budget da spendere, poiché la maggior parte della CO₂ fossile ancora spendibile dovrebbe essere destinata alle economie emergenti, in particolare Africa, India e Cina. Inoltre, i Paesi responsabili dell'attuale emergenza climatica sono tenuti a investire ulteriori risorse nello sviluppo e nella promozione di tecnologie per la cattura e stoccaggio del carbonio (CCS) e ottenere alla fine emissioni negative dal settore delle costruzioni. In questo quadro, i Paesi occidentali sono responsabili del riassorbimento del carbonio fossile emesso in passato, mentre ai paesi del sud del mondo viene chiesto di limitare le loro emissioni future per sviluppare le loro economie in crescita e garantire una transizione verso una società a zero emissioni.

1.4.2. Il contributo dei materiali da costruzione biogenici sul risparmio di CO₂ lungo il ciclo di vita: una preziosa opportunità per la rigenerazione del clima e la crescita sostenibile

L'analisi quantitativa del fabbisogno globale di risorse per l'urbanizzazione futura mostra che senza un nuovo approccio, il consumo di materiali da parte delle aree antropizzate passerà da 40 miliardi di tonnellate nel 2010 a circa 90 miliardi di tonnellate entro il 2050 (Swilling et al., 2018). Numerosi studi sull'analisi del ciclo di vita (LCA) di edifici in Paesi economicamente già sviluppati dimostrano come il contributo sul cambiamento climatico, normalmente misurato attraverso l'indicatore *Global Warming Potential* (GWP) secondo il metodo IPCC (IPCC, 2013), dei materiali da costruzione è diventato sempre più importante negli ultimi anni (Hoxha et al., 2017). Se infatti, in passato le emissioni per l'uso e riscaldamento degli edifici (le cosiddette *operational emissions*) erano dominanti nel ciclo di vita, oggi il loro contributo è diventato minimo, grazie ai sempre più stringenti requisiti per il risparmio energetico (Ritzen et al., 2013). Al contrario, le emissioni specifiche legate ai materiali, misurate in kgCO₂-eq/kg o kgCO₂-eq/m³, non hanno registrato significative riduzioni negli anni, se non quelle legate indirettamente alla decarbonizzazione della rete energetica. Ridurre le emissioni per la produzione dei materiali è infatti molto più complesso rispetto al contenere le emissioni legate all'uso, dove è spesso semplicemente necessario incrementare il livello di isolamento termico dell'involucro edilizio e generare energia termica con impianti ad alta efficienza energetica, possibilmente alimentati con energia rinnovabile (Röck et al., 2019). Oltre alla difficoltà di ridurre le emissioni specifiche ci si ritrova quindi anche nella condizione di dover incrementare la quantità di materiali per m² di edificio, specialmente isolanti termici, accrescendo ancor di più la pressione sul settore produttivo. Se si considera, infine, che nei paesi in via di sviluppo il problema energetico è molto meno sensibile per via di climi spesso tropicali o più miti che non richiedono apporti energetici paragonabili a quelli del nord del mondo, ci si rende immediatamente conto quanto il contributo dei materiali sulle emissioni antropogeniche sia critico. Ingenti quantità di nuovi materiali da costruzione saranno necessari nei prossimi decenni per la compensazione del deficit abitativo nel sud del mondo, così come per la realizzazione di nuove infrastrutture, in larga parte costituite da materiali *carbon-intensive* come il cemento, acciaio e alluminio (Müller et al., 2013).

Per questi motivi è necessario trasformare queste sfide in opportunità. L'edilizia del futuro può essere progettata in modo da ridurre le emissioni o addirittura immagazzinare la CO₂, se basata su un'attenta selezione dei materiali da costruzione (Churkina et al., 2020). Gli edifici possono anche essere progettati come depositi di materiali da riutilizzare in futuro, o

addirittura fungere da catalizzatori per riattivare le reti sociali ed economiche di un quartiere (Brunner, 2011).

L'ampio uso di materiali a base biologica nell'edilizia è un'opportunità preziosa che può portare diversi vantaggi. Infatti, i materiali biogenici non solo sono di natura rinnovabile, ma catturano naturalmente l'anidride carbonica dall'atmosfera durante la loro crescita, per poi essere immagazzinata nella biomassa durante il ciclo di vita come prodotto da costruzione. La rimozione della CO₂ dall'atmosfera e lo stoccaggio in materiali biogenici per un lungo periodo di tempo, influisce positivamente sullo sviluppo del clima terrestre con un effetto rigenerante sul cambiamento climatico. Questo effetto è particolarmente pronunciato se il materiale biogenico si rigenera rapidamente nel suolo, attraverso ad esempio la ricrescita delle foreste o delle piantagioni. L'emissione ritardata di carbonio precedentemente immagazzinata in materiali biogenici a rapida crescita - tipicamente erba, come ad esempio paglia, canapa, canna, bambù, ecc. - viene completamente catturata dalla ricrescita delle colture nel giro di pochi anni, il che rende questi materiali più efficaci nel mitigare il cambiamento climatico rispetto ai prodotti in legno, i quali necessitano invece di lunghi periodi di ricrescita (Pittau et al., 2018). Inoltre, i materiali biogenici a rapida crescita hanno molti altri vantaggi, come la loro economicità, la disponibilità locale, la ridotta energia grigia e le proprietà igrometriche eccezionali, che possono contribuire a migliorare il comfort all'interno di un edificio. La disponibilità e le tipologie di materiali biogenici sono legate allo specifico contesto geografico, e possono essere utilizzati come componenti innovativi in diversi elementi edilizi, come mostrato nella seguente Figura 1.4.4.

Alcuni di questi materiali, ad esempio i bio-calcestruzzi, i blocchi di micelio, ecc., sono proposte innovative e il loro possibile impiego e applicazione nella pratica edilizia è attualmente allo studio, mentre molti altri prodotti sono già utilizzati da secoli nell'edilizia vernacolare. Tuttavia, il loro uso diffuso in una società contemporanea comporta anche una serie di sfide. Se da una parte la loro intrinseca variabilità dovuta alla crescita naturale rende difficile la standardizzazione, dall'altra questo può essere compensato da un incremento della manodopera e del lavoro manuale, che nelle economie emergenti spesso è un fattore positivo in grado di fornire occupazione e competenze specializzate. A differenza delle alternative convenzionali, inoltre, i materiali non convenzionali sono tipicamente apprezzati per i loro vantaggi culturali, ambientali e tecnologici (Suffian et al., 2016). Un crescente interesse per la costruzione alternativa e vernacolare, profondamente radicata nella cultura locale e nelle tradizioni di un luogo, può essere osservato in parallelo all'aumento della ricerca sui materiali non convenzionali, tipicamente di origine naturale, ottenuti o prodotti localmente.

Il settore dell'edilizia, originariamente organizzato in corporazioni commerciali basate su conoscenze empiriche e tradizionali, ha subito nell'ultimo secolo un passaggio da un sistema prettamente qualitativo a uno quantitativo, basato su una ricerca scientifica sofisticata. L'invenzione di nuovi materiali e sistemi di costruzione, come i sistemi a telaio, hanno permesso la creazione di molte strutture straordinarie, ma ha anche richiesto la specializzazione dei



Figura 1.4.4 Bio-calcestruzzi con particelle in legno (a sinistra), pannello isolante con alghe marine (al centro a sinistra), intonaco di seta (al centro a destra), struttura in blocchi di micelio e particelle di legno (a destra).



Figura 1.4.5 Casa vernacolare rurale in Nepal in argilla e paglia.

professionisti dell'edilizia. I costruttori-ingegneri hanno smesso di imparare e tramandare la pratica del "saper costruire" nei cantieri e hanno iniziato ad acquisire conoscenze scientifiche sempre più specifiche nelle aule universitarie. Il sapere tradizionale, passato di generazione in generazione, è stato pian piano sostituito dalla scienza dei materiali, dall'ingegneria strutturale e dalla matematica analitica, materie moderne che hanno spesso confermato, talvolta senza saperle spiegare, l'efficacia delle conoscenze tradizionali, basate su prove empiriche e miglioramenti incrementali a seguito di errori.

Il predominio mondiale delle costruzioni in cemento armato e l'atrofia generale del linguaggio architettonico odierno dimostrano che, oltre alle tradizionali conoscenze empiriche, è andata perduta anche la cultura specifica del luogo. L'architettura vernacolare forma un polo opposto a un'architettura sempre più identica e globalizzata e fortunatamente questa perdita ha stimolato in tempi moderni un crescente interesse per la costruzione passata e per i materiali non convenzionali (Langenbach, 2020), che possono diventare una preziosa opportunità per i Paesi emergenti per sviluppare costruzioni alternative a basse emissioni di carbonio e allo stesso tempo per l'Europa un'occasione per riscoprire materiali della tradizione utili al recupero e rinnovamento degli edifici esistenti.

1.4.3. Nuove diete vegetariane per edifici climate neutral

Al fine di ridurre in modo efficiente le emissioni di CO₂ derivanti dal settore delle costruzioni, è urgente modificare l'attuale "dieta dei materiali" (Rovers, 2019). L'opzione più ragionevole implica che i nuovi edifici debbano necessariamente essere costruiti secondo uno standard a "zero emissioni" in ogni singolo stadio del ciclo di vita. Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, è necessario un passaggio completo verso i materiali biogenici e ridurre l'intensità di carbonio per la lavorazione dei materiali, immagazzinare CO₂ negli elementi e compensare rapidamente l'emissione iniziale attraverso il ripristino del carbonio nei terreni (Pittau et al., 2018).

Come mostrato in Figura 1.4.6, i materiali da costruzione devono essere bilanciati secondo una logica piramidale, simile a quella alimentare, dove i materiali di origine vegetale devono occupare la maggior parte del volume dell'edificio, in modo da compensare le emissioni di carbonio derivanti dai materiali con impronta maggiore, come gli infissi, pannelli solari, materiali metallici e calcestruzzo, quest'ultimo necessario in ogni caso ai fini statici per la realizzazione delle fondazioni e parti interrate degli edifici (Carcassi et al., 2022).

Se da un lato i materiali biogenici comunemente utilizzati in diverse aree del mondo, spesso remote e rurali ricche di risorse naturali, forniscono un modo pratico per affrontare l'estrema povertà, dall'altro purtroppo, l'incremento del benessere rischia di incrementare l'uso del cemento e dell'acciaio, visto come una sorta di *status symbol* economico in tali contesti (Ghavami, 2016). Se si considera inoltre che tali materiali devono essere importati, in quanto richiedono per la produzione e la loro lavorazione infrastrutture imponenti non attualmente disponibili in tali contesti, il danno ambientale che ne scaturisce rischia impatti maggiori. D'altra parte, i materiali a base biologica sono caratterizzati in generale da una ridotta durabilità se utilizzati allo stato naturale. Per tale motivo, è necessario lo sviluppo di tecnologie di lavorazione e trattamento capaci di migliorarne le prestazioni e l'affidabilità, come nel caso del bambù, dove nei paesi asiatici la materia prima viene comunemente trattata con borace e acido borico per respingere gli insetti e aumentare la durata del prodotto finale (Xiao, 2020). Infine, in un'ottica di ottimizzazione delle prestazioni ambientali lungo il ciclo di vita, è



Figura 1.4.6 La piramide dei materiali da costruzione (a destra), che eredita il concetto di quella degli alimenti (a sinistra) per una dieta equilibrata a base vegetale. In cima, materiali ad alte emissioni di CO₂; alla base, materiali rigenerativi a basso contenuto di carbonio, ad esempio legno e materiali a base biologica.

importante valutare attentamente, tramite metodologie dinamiche per il calcolo della LCA, l'efficacia dello stoccaggio del carbonio, poiché la crescente industrializzazione dei materiali a base biologica può portare a sopravvalutarne le capacità e considerare positivamente materiali che in realtà non sono così favorevoli alla rimozione del carbonio dall'atmosfera. Infatti, più un materiale biogenico viene processato, meno è efficace nel compensare le emissioni di carbonio iniziali. Questo è visibile nel confronto tra i culmi di bambù e i pannelli laminati in bambù lamellare (Vogtländer and Van der Lugt, 2013), o nel confronto tra i prodotti di legno più industrializzati, come OSB o MDF, con i segati di legno (Höglmeier et al., 2015). Ciò è dovuto all'aumento del fabbisogno energetico per le lavorazioni più elaborate e all'inclusione di altri materiali come colla e resina, che contribuiscono a ridurre il beneficio dato dallo stoccaggio della CO₂ nel prodotto finale, normalmente non considerato nel calcolo dell'impronta di carbonio secondo lo standard ISO 16745:2017. Di conseguenza, materiali come il calce-canapulo, utilizzato in edilizia come isolante, potrebbero non essere sempre più ecologici rispetto ad altre alternative convenzionali, a causa dell'elevata quantità di leganti minerali utilizzati per tenere insieme le particelle vegetali (Arrigoni et al., 2017). Pertanto, si dovrebbe sempre optare per un materiale che richiede un processo industriale non intensivo e che, idealmente, ha necessitato di lavorazioni fondamentali per rispondere ai requisiti prestazionali essenziali, oltre alla replicabilità e la fattibilità economica.

In Europa, il rinnovamento del parco immobiliare è stato identificato come la chiave di volta principale per raggiungere la neutralità climatica entro il 2100 (Rovers, 2014). Per raggiungere questo obiettivo, l'efficienza energetica degli edifici esistenti dovrebbe essere aumentata del 75% entro il 2030 e il tasso di ristrutturazione dovrebbe essere portato almeno al 4% (Sesana et al., 2020). Pertanto, per migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio sarà necessaria una grande quantità di materiali da costruzione, in particolare isolamento termico, al fine di migliorare le prestazioni termiche degli involucri (Heeren and Hellweg, 2018). Se si utilizzano materiali convenzionali a base fossile, la CO₂ emessa dalla produzione dei materiali rischia di consumare rapidamente il budget rimanente. Al contrario, se l'intera domanda di isolamento supplementare è coperta da soluzioni biogeniche, soprattutto da specie a crescita rapida (ad esempio paglia, canapa, ecc.), gli edifici possono agire come pozzi di assorbimento del carbonio, e la rapida rigenerazione del carbonio nelle colture rimuovere la CO₂ dall'aria, fornendo un budget extra da spendere per la transizione energetica (Pittau et al., 2019).

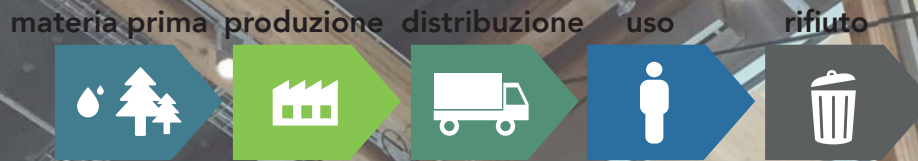
Bibliografia

- Arrigoni A., Pelosato R., Melià P., Ruggieri G., Sabbadini S., Dotelli G., 2017. "Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks", *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 051–1061.
- Brunner P.H., 2011. "Urban mining: a contribution to reindustrializing the city", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 15, pp. 339–341.
- Carcassi O.B., Habert G., Malighetti L.E., Pittau F. (2022), "Material Diets for Climate-Neutral Construction", *Environmental Science & Technology*, vol. 56(8), pp. 5213–5223.
- Churkina G., Organschi A., Reyer C.P.O., Ruff A., Vinke K., Liu Z., Reck B.K., Graedel T.E., Schellnhuber H.J., 2020. "Buildings as a global carbon sink", *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 269–276.
- Dutil Y., Rouse D., Quesada G., 2011. "Sustainable buildings: An ever evolving target", *Sustainability*, vol. 3, pp. 443–464.
- Ghavami K., 2016. "Introduction to nonconventional materials and an historic retrospective of the field", in: *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Elsevier, pp. 37–61.
- Heeren N., Hellweg S., 2018. "Tracking construction material over space and time: Prospective and geo-referenced modeling of building stocks and construction material flows", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23(1), pp. 253–267.
- Höglmeier K., Steubing B., Weber-Blaschke G., Richter K., 2015. "LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood", *Journal of Environmental Management*, vol. 152, pp. 158–170.
- Hoxha E., Habert G., Lasvaux S., Chevalier J., Le Roy R., 2017. "Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability", *Journal of Cleaner Production*, vol. 144, pp. 33–47. h
- IPCC, 2018. Figure: Characteristics of four illustrative model pathways. *Glob. Warm. 1.5°C 1*.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Isaac M., Kram T., Hof A., van Ruijven B., Stehfest E., Oostenrijk R., den Elzen M.G.J., Klein Goldewijk K., Mendoza Beltran A., van Vliet J., van Vuuren D.P., Deetman S., 2011. "RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C", *Climatic Change*, vol. 109, pp. 95–116.
- ISO 16745-1:2017. *Sustainability in buildings and civil engineering works — Carbon metric of an existing building during use stage — Part 1: Calculation, reporting and communication*
- Langenbach R., 2020. *What we learn from vernacular construction, Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Elsevier Ltd.
- Latake P.T., Pawar P., 2015. "The Greenhouse Effect and Its Impacts on Environment", *International Journal of Innovative Research and Creative Technology*, vol. 1, pp. 333–337.
- Medici A., 2019. *Building in a Carbon Budgeted World*. ETH Zurich.
- Müller D.B., Liu G., Løvik A.N., Modaresi R., Pauliuk S., Steinhoff F.S., Bratlebø H., 2013. "Carbon emissions of infrastructure development", *Environmental Science & Technology*, vol. 47, pp. 11739–11746.
- Nouvelles simulations du climat: vers un réchauffement plus fort que prévu [WWW Document], n.d. URL <http://www.meteofrance.fr/actualites/75667479-nouvelles-simulations-du-climat-vers-un-rechauffement-plus-fort-que-prevu> (accessed 10.25.19).

- Pittau F., Krause F., Lumia G., Habert G., 2018. "Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls", *Building and Environment*, vol. 129, pp. 117–129.
- Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G., 2019. "Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock", *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 365-376.
- Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J., 2012. "Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry", *Geophysical Research Letters*, vol. 39, pp. 6–10.
- REN21, 2018. *Renewables 2018 Global Status Report*.
- Ritzen M., Rovers R., Gommans L., Geurts C., 2013. "Insulation versus installation – an exploration towards maximization", in: *Sustainable Building 13 - Implementing Sustainability - Barriers and Chances*. Munich, Germany.
- Röck M., Ruschi Mendes Saade M., Balouktsi M., Nygaard F., Birgisdottir H., Frischknecht R., Habert G., Lützkendorf T., 2019. "Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation", *Applied Energy*, vol. 131, 114107.
- Roser M., Ortiz-Ospina E., 2016. *Global Rise of Education*. *Our World Data*, 1–22. <https://ourworldindata.org/global-education>
- Rovers R., 2019. *People vs Resources: restoring a world out of balance*, Eburon Academic Publishers.
- Rovers R., 2014. "New energy retrofit concept: 'renovation trains' for mass housing", *Building Research & Information*, vol. 42, pp. 757–767.
- Sesana M.M., Rivallain M., Salvalai G., 2020. *Overview of the Available Knowledge for the Data Model Definition of a Building Renovation Passport for Non-Residential Buildings: the ALDREN Project Experience*.
- Smith P., Davis S.J., Creutzig F., Fuss S., Minx J., Gabrielle B., Kato E., Jackson R.B., Cowie A., et al., 2015. "Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions". *Nature Climate Change*, vol. 6. pp. 42–50.
- Suffian S., Dzombak R., Mehta K., 2016. "Future directions for nonconventional and vernacular material research and applications", in K. Harries, B. Sharma (eds), *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*, pp. 63–80.
- Swilling M., Hajer M., Baynes T., Bergesen J., Labbé F., Musango J.K., Ramaswami A., Robinson B., Salat S., Suh S., Currie P., Fang A., Hanson A., Kruit K., Reiner M., Smit S., Tabory S., 2018. *The Weight of Cities: Resource requirements of future urbanization*, UN Environment - International Resource Panel.
- UNEP, 2016. *Global Status Report, 2016: Towards zero-emission efficient and resilient buildings*.
- Vogländer J.G., Van der Lugt P., 2013. *The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products: Life-cycle Assessment and Carbon Sequestration*.
- Xiao Y., 2020. *Engineered bamboo in China, Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Elsevier Ltd.
- Zhou W., 2018. *Mitigation Pathways Compatible With 1.5°C in the Context of Sustainable Development*. *Glob. Warm. 1.5°C*. An IPCC Spec. Rep. [...] 2.

2. Economia circolare

ECONOMIA LINEARE



ECONOMIA CIRCOLARE



2.1 Life Cycle Assessment come strumento di supporto alle politiche di economia circolare nel settore edilizio

La Commissione Europea, nel 2019, ha lanciato il *Green Deal* Europeo (Commissione Europea, 2019), ovvero una nuova strategia che mira ad evitare la generazione delle emissioni di gas a effetto serra entro il 2050, promuovendo un'economia dissociata dall'uso delle risorse. Il *Green Deal* Europeo ha rilanciato l'obiettivo di economia circolare, promosso dal 2014 (Commissione Europea, 2014; Commissione Europea, 2015) come una sorta di *win-win solution* dal punto di vista ambientale, economico e sociale, allo scopo di ridurre il consumo delle risorse e la generazione dei rifiuti attivando un circuito di chiusura delle risorse materiali. Ciò promuove l'individuazione di opportunità di scambio/riciclaggio di sottoprodotti attraverso l'apertura di nuove sinergie industriali (simbiosi industriale, parchi eco-industriali, metabolismo urbano). In tale contesto, la Commissione Europea identifica il settore edilizio come un settore prioritario, in quanto esso assorbe significative quantità di risorse minerarie e rappresenta la prima causa di generazione di rifiuti (Figura 2.1.2). Inoltre, il *Green Deal* Europeo pone particolare attenzione all'attività di ristrutturazione del parco immobiliare negli Stati membri, dichiarando che attualmente essa varia dallo 0,4 all'1,2% e che tale ritmo dovrà essere almeno raddoppiato per raggiungere gli obiettivi dell'UE per il 2050.

Risulta necessario individuare strategie che possano introdurre modelli di economia circolare durante le attività di costruzione, ristrutturazione e demolizione, modificando il processo decisionale, promuovendo la manutenzione e il prolungamento della vita degli edifici esistenti e modificando i flussi di materiali/rifiuti per una maggiore conservazione delle risorse. Occorre, però, considerare che le strategie circolari da attivare, come il riutilizzo e il riciclaggio, sono attività che comunque possono comportare impatti ambientali (Di Maria, 2017; Butera et al., 2015; Ghose et al., 2017). Tuttavia, in letteratura non è ancora chiaro il legame tra economia circolare e sostenibilità (Blosma, 2017). La maggior parte degli studi scientifici che tratta l'attivazione di processi circolari, non effettua una valutazione della sostenibilità degli stessi (Giorgi et al., 2017) e anche nella pratica la valutazione ambientale a supporto di strategie circolari risulta poco applicata (Giorgi et al., 2022).

Al fine di attivare un'economia non solo "circolare" ma anche "sostenibile", è necessario valutare ogni volta l'effettiva sostenibilità della circolarità in prospettiva *life cycle*. Pertanto, l'introduzione di strumenti di valutazione della sostenibilità ambientale, come il *Life Cycle Assessment*, durante le varie fasi del processo edilizio è, ora più che mai, fondamentale.

Per poter mettere in atto la transizione verso un processo edilizio circolare e sostenibile è fondamentale il coinvolgimento sia dei responsabili politici, che devono modificare il quadro legislativo, sia di tutti gli operatori del settore edilizio, che devono modificare i loro modelli organizzativi e di business.

A partire dai risultati della tesi di dottorato *Circular Economy and regeneration of the building stock. Policies improvement, strategic partnership and life cycle decision-making tools* (Giorgi, 2020)¹, che attraverso una serie di interviste dirette agli operatori analizza barriere e leve per l'attivazione di strategie circolari e sostenibili lungo il processo di rigenerazione del

¹Giorgi S., 2020. *Circular Economy and regeneration of the building stock. Policies improvement, strategic partnership and life cycle decision-making tools*, Tesi di dottorato, supervisors: Prof. Monica Lavagna, Prof. Andrea Campioli, Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering, XXXII cycle, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.

Serena Giorgi

Architetto, PhD e assegnista di ricerca presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team.

E-mail: serena.giorgi@polimi.it

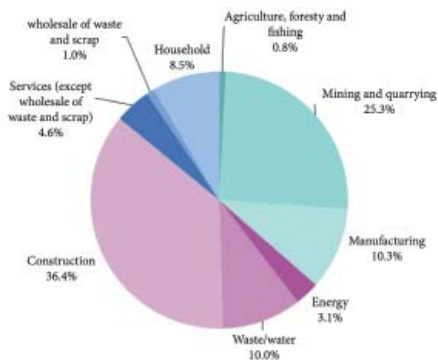


Figura 2.1.1 Generazione di rifiuti da parte di attività economiche e famiglie, UE-28, 2016. Fonte: Eurostat, 2019.

patrimonio edilizio, il presente contributo, alla luce della situazione attuale, vuole mostrare:

- il livello di applicazione della valutazione della sostenibilità ambientale nei processi circolari in letteratura;
- gli approcci per la promozione degli strumenti di valutazione *life cycle* adottati dalle politiche di alcune nazioni europee;
- i futuri adempimenti per applicare la valutazione della sostenibilità ambientale lungo il processo di rigenerazione del patrimonio edilizio.

2.1.1 Economia circolare e sostenibilità ambientale

Dall'analisi critica dello stato dell'arte è emerso che attualmente la maggior parte delle ricerche scientifiche che tratta l'applicazione dell'economia circolare si concentra sulla gestione dei rifiuti, promuovendo processi di riciclo di prodotti pre-consumo e post-consumo (Giorgi et al., 2017).

Le politiche europee che promuovono l'economia circolare puntano in particolar modo sulla riduzione dei rifiuti, emanando protocolli e linee guida (Commissione Europea, 2016; Commissione Europea, 2018), rifacendosi alla *Waste Framework Directive* (2008/98/CE) che, comunque, mostra alcuni aspetti critici: ad esempio, per il raggiungimento della soglia minima di recupero, la Direttiva 2008/98/CE considera un approccio quantitativo e non qualitativo, accetta forme di *downcycling* e si pone con un approccio *down-stream* (Giorgi et al., 2017b), ovvero riferendosi alla gestione dei rifiuti quando ormai gli stessi sono già stati generati. È importante evidenziare, però, che tale approccio potrebbe comportare il rischio che l'economia circolare favorisca l'accorciamento della vita utile dei prodotti, che trovano nel riciclaggio il rimedio ambientale di un fine-vita precoce, portando però di fatto a un aumento della produzione e dei consumi.

L'applicazione di strategie di circolarità nell'ambito del settore edilizio, in particolare, tende a limitarsi alla gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione, identificando quantitativamente i flussi materici e cercando di trovare una soluzione al problema dei rifiuti attraverso la gestione degli stessi, anche con pratiche di *downcycling* come il riciclo degli aggregati per sottofondi stradali. Sono invece meno trattati i temi riguardanti gli approcci di progettazione che evitano la generazione dei rifiuti e riguardanti nuovi modelli di business per una migliore gestione del prodotto nell'intero ciclo di vita.

Per mirare agli obiettivi di circolarità e sostenibilità è necessario promuovere strategie circolari mirate all'allungamento della vita utile del prodotto (e dell'edificio) e all'attivazione di nuovi meccanismi circolari che siano motivati da obiettivi rivolti alla sostenibilità non solo economica ma anche ambientale, con approccio al ciclo di vita, applicando strumenti di verifica e di valutazione *life cycle*.

Tuttavia, in letteratura è emerso che il legame tra economia circolare e sostenibilità non è ancora chiaro (Geissdoerfer et al., 2017; Giorgi et al., 2017; Pomponi et al., 2017) e la maggior parte delle ricerche propone l'attivazione di meccanismi circolari senza effettuare valutazioni sulla reale sostenibilità ambientale ed economica in prospettiva *life cycle*. L'applicazione degli strumenti di verifica della sostenibilità con approccio al ciclo di vita del prodotto sono poco applicati sia per la scelta del materiale da costruzione (es. prodotto da materia prima oppure, con contenuto di riciclato o riciclabile) sia per la scelta della tecnologia costruttiva (es. a secco, reversibile).

Per valutare l'effettiva sostenibilità delle strategie circolari sono necessari, quindi, la

definizione e l'adozione di strumenti che consentano di quantificare benefici ambientali dei prodotti e dei processi di recupero e di gestione degli stessi.

L'obiettivo di stabilire un approccio metodologico comune per consentire agli Stati membri di divulgare e confrontare le prestazioni ambientali di prodotti, attraverso la dichiarazione degli impatti ambientali provocati durante il loro ciclo di vita, è stata già discussa dalla Commissione Europea (Commissione Europea, 2011). In questo contesto, la valutazione LCA è stata riconosciuta come lo strumento più adatto per misurare l'impatto ambientale di un prodotto per l'intero ciclo di vita, dall'estrazione dei materiali al loro smaltimento. Conseguentemente, gli strumenti *Life Cycle Assessment* (EN 15978:2011) il *Life Cycle Cost* (EN 16627:2015) e il *Social-Life Cycle Assessment* (EN 16309:2014), possono essere utilizzati come strumenti di supporto alle decisioni per la (ri)progettazione delle tecnologie costruttive e la (ri)organizzazione del processo edilizio nella transizione verso la circolarità e sostenibilità.

2.1.2 Promozione degli strumenti Life Cycle

La promozione dell'utilizzo degli strumenti *Life Cycle* in edilizia principalmente può avvenire in due modi: da un lato, facendo leva sulla competitività tra le aziende e sull'utilizzo di strumenti volontari (certificazione di sostenibilità ambientale degli edifici, come LEED, BREEAM, ecc.) che richiedono il soddisfacimento di alcuni criteri tramite valutazione LCA, attraverso lo sviluppo e la diffusione di strumenti *open-source* LCA a servizio di progettisti o *stakeholders* (approccio *bottom-up*), dall'altro lato attraverso l'emanazione di normative nazionali che obbligano lo svolgimento di una valutazione LCA al fine di ottenere un permesso edilizio (approccio *top-down*).

Negli ultimi anni, sono state promosse diverse iniziative *bottom-up* attraverso lo sviluppo di strumenti di valutazione della sostenibilità *life cycle*, messi a disposizione ai progettisti, di facile utilizzo, compatibili con le tecnologie digitali impiegate lungo il processo di progettazione come il *Building Information Model* (BIM) e altri software di modellazione termica (Lowres et al., 2017; Means et al., 2015).

Diverse nazioni europee hanno già sviluppato e diffuso software LCA, conformi agli standard EN15804 ed EN15978 utili ai progettisti, come Legep per la Germania, Ecosoft per l'Austria ed Elodie per la Francia (Dalla Valle et al., 2016), o stanno particolarmente sviluppando software LCA per la valutazione di strategie circolari in edilizia, come Totem in Belgio.

Anche il recente lavoro svolto dalla ricerca europea BAMB (*Buildings as Material Banks*) ha promosso l'utilizzo degli strumenti di controllo della sostenibilità, in prospettiva *life cycle*, per valutare diverse strategie circolari, sviluppando un nuovo strumento chiamato *Circular Building Assessment* (CBA), che utilizza la metodologia LCA e LCC ed è compatibile con gli strumenti BIM (in quanto entrambi sono basati sul formato di riferimento di scambio file definito dalla ISO 16739).

Gli strumenti di valutazione della sostenibilità *life cycle*, già sul mercato o in fase di diffusione, generalmente sono mirati al ruolo chiave del progettista e utili durante la fase decisionale della progettazione per confrontare e quantificare la sostenibilità economica e ambientale di diverse alternative progettuali e di diverse strategie per la circolarità, come il riuso di componenti e tecnologie reversibili. Inoltre, tali strumenti sono economicamente accessibili e semplificano il processo di valutazione ed analisi dei risultati, avendo un database interno e aspetti metodologici prestabiliti, come i metodi di allocazione, normalizzazione e di calcolo degli indicatori ambientali. Tuttavia, è da sottolineare che questi software si presentano come

modelli *black box*, in quanto l'utente non conosce effettivamente come i risultati siano stati generati. Ciò può comportare un uso non efficace del software che viene utilizzato in modo "compilativo", solo per soddisfare le richieste di valutazione *life cycle* e non in fase decisionale ma a valle delle scelte progettuali.

Interviste dirette agli operatori del settore edilizio, compiute ai fini della ricerca dottorale (Giorgi, 2020), hanno sottolineato che la sola strategia di promozione *bottom-up* degli strumenti *life cycle*, attraverso lo sviluppo e la diffusione di *tools user-friendly*, è ancora poco efficace. Risultano, infatti, pochi i progettisti che autonomamente introducono nel processo edilizio una valutazione *life cycle* in quanto, se non vi è una specifica richiesta da parte del committente, è rara la decisione da parte del progettista di investire tempo e denaro per compiere questo genere di valutazione nelle scelte progettuali.

Differente è quando esistono normative e iniziative politiche che impongono l'utilizzo di tale valutazione, ovvero un approccio di incentivazione *top-down*.

Alcune *best-practices top-down* a livello europeo riferite all'utilizzo degli strumenti *life cycle* nelle politiche di economia circolare emergono in Belgio, in particolare nei Paesi Bassi e nelle Fiandre. I due paesi infatti hanno introdotto la metodologia *Life Cycle Assessment* nelle politiche di transizione verso l'economia circolare e, solo in conseguenza alle politiche, hanno sviluppato strumenti di supporto per gli *stakeholders* del settore edilizio.

Nel Paesi Bassi, le politiche di economia circolare che mirano alla riduzione del 50% del consumo delle risorse entro il 2030 e del 100% entro il 2050, attraverso il raggiungimento di un'economia basata su un modello circolare *closed loop* (Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs, 2016), hanno rafforzato la normativa riguardante il calcolo della prestazione ambientale degli edifici. In questa nazione, l'utilizzo dello strumento LCA è richiesto dal 2012 per decreto legislativo (*Milieuprestatieberekening van gebouwen*, art. 5.8 e 5.9), che impone l'obbligatorietà di dichiarazione delle prestazioni ambientali degli edifici (MPG - *Milieuprestatie Gebouwen*) per nuove abitazioni ed edifici per uffici con superficie maggiore di 100 m², tramite l'analisi del ciclo di vita LCA. Dal primo gennaio 2018, quindi a seguito delle politiche di economia circolare, è stato applicato per legge un valore limite massimo di impatto ambientale che gli edifici in questione devono rispettare. In prospettiva di economia circolare, il calcolo MPG considera la frequenza di sostituzione dei materiali e la manutenzione durante la vita di un edificio. Per facilitare la comprensione dei risultati LCA, la legislazione olandese ha definito la trasformazione degli indicatori di impatto, attraverso il metodo di monetizzazione, in un unico valore economico, chiamato *shadow cost* ed espresso in €/m² anno (Van Gemert, 2019).

Nelle Fiandre, il programma politico definito al fine di promuovere la transizione verso l'economia circolare nel settore edilizio, tra i 5 obiettivi fondamentali, include quello di ridurre gli impatti ambientali del costruito (OVAM, 2018). Detto obiettivo ha come finalità l'introduzione obbligatoria della valutazione ambientale degli edifici (nuovi o riqualificati) attraverso l'analisi LCA, anche al più ampio fine di controllare e quantificare gli impatti ambientali dell'attività totale di *urban mining*, intesa come recupero e rimpiego dei materiali stoccati nel patrimonio edilizio esistente per le nuove attività edilizie (Baccini et al., 2012; Cossu et al., 2015). Pertanto, al fine di ottenere una uniforme e coerente analisi del ciclo di vita, il programma ha promosso lo sviluppo del sistema nazionale MMG - *Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouw(element)en* (De Nocker et al., 2018), ovvero un metodo di calcolo condiviso e semplificato per ottenere l'impatto ambientale degli edifici conforme al metodo LCA (EN 15978:2011), stabilendo le formule per quantificare le attività di riuso e riciclo. Inoltre, il metodo prevede la conversione degli impatti ambientali in valore monetario

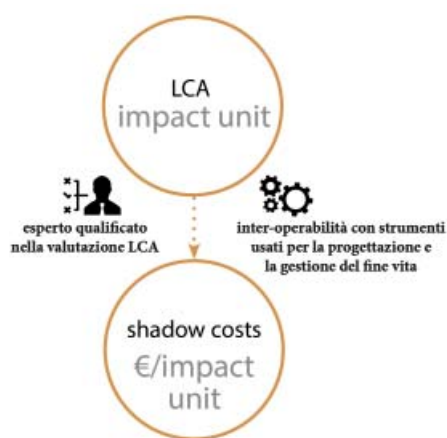


Figura 2.1.2 Schema della monetizzazione degli impatti ambientali. Fonte: elaborazione dell'autore.

| categoria di impatto | unità equivalente | fattori di monetizzazione [€/kg unità equivalente] | | | | MPG Fonte: Anink et al. 2015 |
|---|---------------------------------------|---|----------|----------|--------|---------------------------------------|
| | | MMG (Western Europe) Fonte: De Nocker et al. 2018 | | | | |
| | | central | low | high | | |
| Abiotic depletion potential for non-fossil resources (ADPE) | kgSb eq | 1,56 | 0 | 6,23 | 0,16 | |
| Abiotic depletion potential for fossil resources (ADPF) | kgSb eq | -- | -- | -- | 0,16 | |
| | MJ, net calorific value | 0 | 0 | 0.0065 | -- | |
| Global warming potential (GWP) | kgCO ₂ eq | 0,05 | 0,025 | 0,10 | 0,05 | |
| Depletion potential of the stratospheric ozone layer (ODP) | kgCFK-11 eq | 49,10 | 25,00 | 100 | 30,00 | |
| Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants (POCP) | kgC ₂ H ₂ eq | 0,48 | 0 | 6,60 | 2,00 | |
| Acidification potential of land and water (AP) | kgSO ₂ eq | 0,43 | 0,22 | 0,88 | 4,00 | |
| Eutrophication potential (EP) | kg (PO ₄) ³ eq | 20,00 | 6,60 | 60,00 | 9,00 | |
| Human toxicity (HTP) | 1,4-DCBeq | -- | -- | -- | 0,09 | |
| | CTUh cancer effect *a | 665,109 | 166,277 | 2660,43 | -- | |
| | CTUh non-cancer effect *b | 144,081 | 28,816 | 720,407 | -- | |
| Freshwater aquatic ecotoxicity (FAETP) | 1,4-DCBeq | | | | 0,03 | |
| | CTUe *c | 3,70E-05 | 7,39E-06 | 1,85E-04 | | |
| Marine aquatic ecotoxicity (MAETP) | 1,4-DCBeq | -- | -- | -- | 0,0001 | |
| Terrestrial ecotoxicity (TETP) | 1,4-DCBeq | -- | -- | -- | 0,06 | |
| Particulate matter | kgPM2.5 | 34,00 | 12,70 | 85,00 | -- | |
| Ionising radiation: human health effects | kg U235 eqv. | 9,7E-04 | 3,2E-04 | 2,9E-03 | -- | |
| Water scarcity | m ³ water eqv. | 0,067 | 0,022 | 0,200 | -- | |
| Land use occupation, soil organic matter | kg C deficit | 1,4E-06 | 3,4E-07 | 0,6E-05 | -- | |
| Land use occupation, biodiversity | m ² a *d | 0,30 | 0,07 | 2,35 | -- | |
| | m ² a *e (agriculture) | 6,0E-03 | 1,5E-03 | 2,4E-02 | -- | |
| | m ² a *e (forestry) | 2,2E-04 | 5,5E-05 | 8,8E-04 | -- | |
| Land use transformation, soil organic matter | kg C deficit | 1,4E-06 | 3,4E-07 | 0,6E-05 | -- | |
| Land use transformation, biodiversity | m ² *f | -- | -- | -- | -- | |
| | m ² *g | 27,00 | 6,90 | 110,00 | -- | |

Tabella 2.1.1 Esempi di fattori di monetizzazione per categoria di impatto. Confronto tra il sistema dei Paesi Bassi, MPG (*Milieuprestatie Gebouwen*), e il sistema del Belgio, MMG (*Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouw(element)en*). Fonte elaborazione dell'autore di dati tratti da De Nocker et al. 2018 e Anink et al. 2015.

(Tabella 2.1.1). Insieme alla metodologia, il programma fiammingo sta sviluppando uno strumento utile a chi dovrà effettuare la valutazione ambientale, chiamato TOTEM (*Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials*).

Tuttavia, l'introduzione della valutazione LCA lungo il processo edilizio, sia con approccio *bottom-up* sia *top-down*, deve essere correlato a una serie di iniziative che permettano di attivare il meccanismo di valutazione. È necessario, quindi, facilitare lo scambio di informazioni tra gli operatori chiave del processo, la formazione di esperti che possano consapevolmente effettuare una valutazione LCA e l'individuazione dei momenti del processo edilizio nei quali

è necessario effettuare una valutazione per supportare le decisioni. Tra i risultati della ricerca di dottorato (Giorgi, 2020), viene evidenziato come gli strumenti *life cycle* per la valutazione delle strategie circolari lungo il processo edilizio possano essere attivati agendo, allo stesso tempo, su tre livelli: quello delle politiche, quello delle relazioni tra gli operatori e quello degli strumenti di supporto al processo decisionale.

2.1.3 Applicazione della valutazione della sostenibilità lungo il processo edilizio

Per promuovere la valutazione della sostenibilità *life cycle* in ambito legislativo è possibile ricalcare il sistema applicato nei Paesi Bassi, che rende obbligatorio la dichiarazione della prestazione ambientale dell'edificio. L'introduzione di quest'obbligo richiede un periodo graduale di accettazione nella pratica edilizia, come accadde con l'EPBD per migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio. Di conseguenza, seguendo il modello olandese, è possibile iniziare attraverso l'obbligo della valutazione della sostenibilità di una certa categoria di edifici, ad esempio in relazione ai metri quadrati (iniziando dagli interventi più consistenti, che hanno la possibilità di finanziare la valutazione) per poi pensare che dopo circa sei anni sia possibile raggiungere l'obbligo più ambizioso di rispettare una soglia massima degli impatti, estendendo, in un ulteriore successivo momento, l'obbligo a tutti i tipi e dimensione di edifici. Il periodo permette di validare la procedura, di creare mercato, di formare esperti e di abbassare quindi i costi per rendere accessibile a tutti la valutazione LCA.

Oltre ai miglioramenti legislativi è necessaria l'individuazione di nuove figure professionali. La valutazione LCA richiede operatori esperti: questi possono anche lavorare con strumenti semplificati con prestabiliti database, confini di sistema e metodi di allocazione (uno strumento comune può aiutare l'uso del calcolo LCA e armonizzare i risultati), tuttavia, è importante che la persona che effettua il calcolo, abbia la preparazione e le conoscenze per comprendere i risultati della valutazione d'impatto, ottenuta tramite una formazione certificata. Inoltre, è fondamentale l'incoraggiamento di relazioni strategiche tra operatori del settore edilizio. Diventa cruciale, quindi, lo scambio di informazioni diretto tra l'esperto della sostenibilità con investitore e progettista in tutte le fasi decisionali del progetto (Fig.

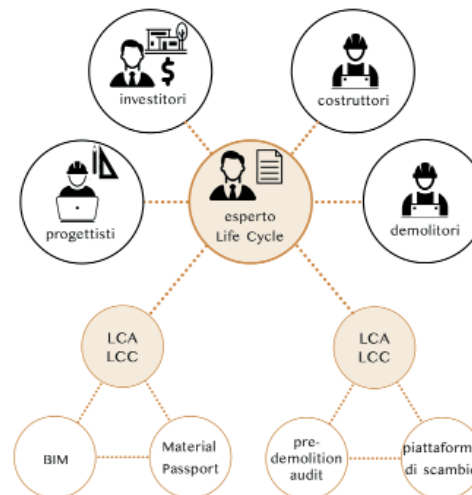


Figura 2.1.3 Nuove figure professionali, relazioni strategiche tra operatori e interazione tra strumenti.

2.1.3), per poter valutare differenti scelte tecnologiche, e con gli operatori del cantiere in tutte le fasi gestionali di costruzione e demolizione, per avere il controllo dei flussi materici e di energia.

Infine, è necessario promuovere la valutazione ambientale in due specifiche fasi del processo edilizio: fase di progettazione, dalla preliminare alla esecutiva, e di fine vita. In ciascuna fase è determinante individuare con quali supporti digitali deve interagire lo strumento LCA.

Durante la progettazione preliminare la valutazione ambientale deve essere usata come supporto per decidere il tipo di intervento e gli scenari possibili di riuso dei componenti provenienti dall'edificio stesso esistente oppure dai flussi materici secondari circostanti; durante la progettazione definitiva la suddetta valutazione è utile a guidare la scelta dei materiali e delle tecnologie costruttive, ad esempio verso soluzioni reversibili; durante la progettazione esecutiva, possono essere selezionati prodotti sul mercato non solo reperibili a livello locale ma anche dotati di certificazione ambientale e che si connotano per un buon livello di contenuto di riciclato. In queste fasi progettuali lo strumento LCA deve interagire con gli strumenti utilizzati per la progettazione, che sono in particolare il BIM e i software che permettono l'elaborazione di *materials passports*².

Durante la fase di fine vita la valutazione ambientale deve essere usata come supporto per decidere la gestione e la destinazione del materiale/rifiuto (ad esempio tra riutilizzo, riciclaggio o smaltimento in discarica) in considerazione degli impatti del processo di trasformazione e trasporto, per evitare che gli impatti di gestione vanifichino i benefici del riuso/riciclo. In questa fase, gli strumenti del ciclo di vita potrebbero interagire con gli strumenti che si stanno diffondendo come i *pre-demolition audit*³ e le piattaforme digitali per lo scambio di materia prima seconda.

2.1.4 Conclusioni

Il capitolo discute l'importante questione di collegare le strategie di circolarità e la valutazione della sostenibilità ambientale, per evitare di innescare attività concepite in prospettiva di economia circolare (come fenomeni di riciclo e di scambio di sotto-prodotti), ma che non sono effettivamente sostenibili in una prospettiva del ciclo di vita.

Il *Life Cycle Assessment* è uno strumento utile per il supporto delle decisioni degli operatori del processo di costruzione e riqualificazione degli edifici.

Il contributo evidenzia che la tendenza attuale di fornire ai progettisti *software user-friendly* per la valutazione degli impatti lungo il ciclo di vita (approccio *bottom-up*) deve essere sostenuta da cambiamenti normativi (approccio *top-down*).

Si possono prendere come esempio alcune *best-practice* europee che hanno introdotto la valutazione LCA a sostegno delle nuove politiche per un'economia circolare.

In questi contesti, si nota come le normative nazionali, per facilitare la comprensione dei risultati a tutti gli *stakeholders*, stiano promuovendo la trasformazione degli indicatori di impatto in un unico valore economico, attraverso l'approccio metodologico della monetizzazione.

Per realizzare la transizione verso un processo edilizio circolare sostenibile, oltre ad un cambiamento nel quadro legislativo, è fondamentale l'attivazione di relazioni strategiche, la formazione di nuovi operatori che possano affiancare il progettista e la definizione di strumenti LCA, armonizzati a livello nazionale o, ancora meglio, internazionale, che possano interagire con gli altri software utilizzati durante le fasi di progettazione e di fine vita a

² Il *material passport* è l'insieme (digitale) di dati che descrivono e conservano le informazioni riguardo tutte le caratteristiche di materiali, componenti, prodotti e sistemi al fine di conoscere il loro valore intrinseco per il recupero e il riutilizzo (EPEA et al., 2017)

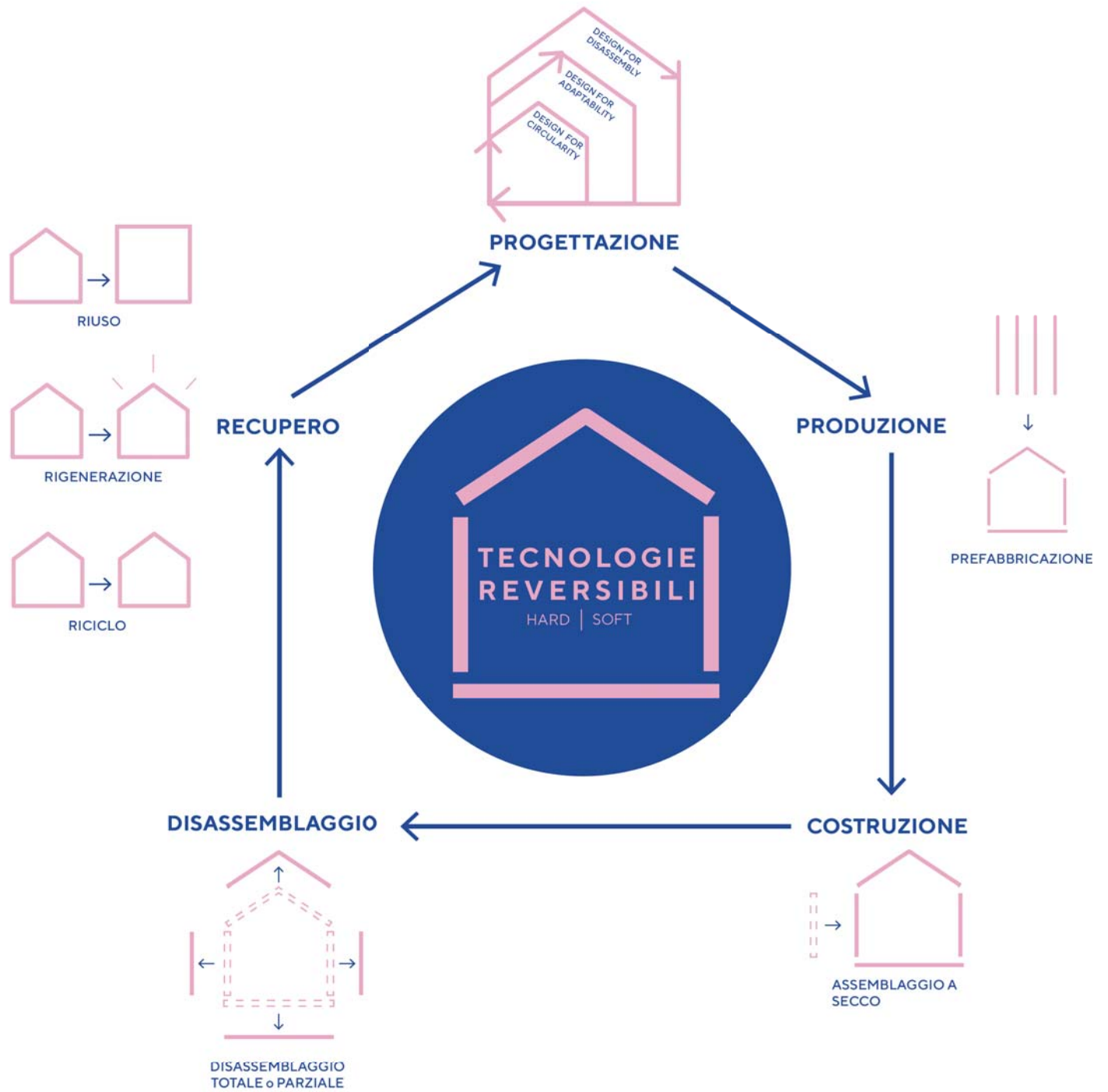
³ Il *pre-demolition audit* è lo strumento che aiuta ad identificare i rifiuti da costruzione e demolizione generati durante il processo edilizio al fine di gestire al meglio le pratiche di demolizione. L'*audit* contiene una raccolta di informazioni sulla quantità di tutti i rifiuti che verranno generati durante la demolizione, quali materiali devono (obbligatoriamente) essere separati alla fonte (come rifiuti pericolosi), quali materiali possono/non possono essere riutilizzati o riciclati e come saranno gestiti i rifiuti (non pericolosi e pericolosi) e le possibilità di riciclaggio. L'*audit* pre-demolizione viene eseguito, da un esperto qualificato, prima della fase di demolizione (Commissione Europea, 2016).

supporto della scelta di prodotti/processi circolari sostenibili.

Bibliografia

- Anink D., Van Ewijk H., Schuurmans A., Nieman H., Van Luijk P., Levels-Vermeer J., 2015. *Bepaling van de milieuprestaties van gebouwen en gww-werken (MPG) Geactualiseerde versie*.
- Baccini P., Brunner P.H., 2012. *Metabolism of the Anthroposphere - Analysis, Evaluation, Design*, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology.
- Butera S., Christensen T.H., Astrup T.F., 2015. "Life cycle assessment of construction and demolition waste management", *Waste Management*, vol. 44, pp. 196–205.
- Commissione Europea, 2011. *Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse*. COM (2011). 571.
- Commissione Europea, 2014. *Verso un'economia circolare: programma per un'Europa a zero rifiuti*. COM (2014). 398.
- Commissione Europea, 2015. *L'anello mancante-piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare*. COM (2015). 614.
- Commissione Europea, 2016. *EU Construction and demolition waste management Protocol*. <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/20509/attachments/1/translations/>
- Commissione Europea, 2018. *Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of building*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/31521>
- Commissione Europea, 2019. *Il Green Deal europeo*. Brussels. COM (2019). 640.
- Cossu R., Williams I.D., 2015. "Urban mining: Concepts, terminology, challenges", *Waste Management*, vol. 45, pp. 1-3.
- Dalla Valle A., Lavagna M., Campioli A., 2016. "Strumenti LCA di supporto al settore delle costruzioni", *Atti del X Convegno della Rete Italiana LCA. Life Cycle Thinking, sostenibilità ed economia circolare*, Ravenna - 23-24 giugno.
- De Nocker L., Debacker W., 2018. *Annex: Monetisation of the MMG method (update 2017)*. OVAM.
- Di Maria A., Eyckmans J., Van Acker K., 2018. "Combining social, environmental and economic analysis to stimulate high-grade recycling of construction & demolition waste", *Waste management*, vol. 75, pp. 3-21.
- Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 312/3 del 19 novembre 2008.
- EPEA and SundaHus, 2017. *Framework for materials passports*. BAMB report. <https://www.bamb2020.eu>
- Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N.M.P., Hultink E.J., 2017. "The circular economy—A new sustainability paradigm?", *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757–768.
- Ghose A., Pizzol M., McLaren S.J., 2017. "Consequential LCA modelling of building refurbishment in New Zealand- an evaluation of resource and waste management scenarios", *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 119-133.
- Giorgi S., 2020. *Circular Economy and regeneration of the building stock. Policies improvement, strategic partnership and life cycle decision-making tools*. Tesi di dottorato, Supervisors: Lavagna M., Campioli A., Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering, XXXII Ciclo, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.
- Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2017. "Economia Circolare, Gestione dei rifiuti e Life

- Cycle Thinking. Fondamenti, interpretazioni e analisi dello stato dell'arte", *Ingegneria dell'Ambiente*, vol. 4 (3), pp. 245- 254.
- Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2017b. "Guidelines for effective and sustainable recycling of construction and demolition waste", in Benetto E., Gericke K., Guiton M. (eds), *Designing Sustainable Technologies, products and Policies – From Science to Innovation*, Springer.
- Giorgi S., Lavagna M., Wang K., Osmani M., Liu G., Campioli A., 2022. "Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices", *Journal of Cleaner Production*, vol. 336, 130395.
- Lowres F., Hobbs G., 2017. "Challenging the current approach to end of life of buildings using a life cycle assessment (LCA) approach", *International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*, pp. 247-250.
- Means P., Guggemos A., 2015. "Framework for Life Cycle Assessment (LCA) based environmental decision making during the conceptual design phase for commercial buildings", *Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 802-812.
- Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs, 2016. *A Circular Economy in the Netherlands by 2050*. <https://www.government.nl/documents/policy-notes/2016/09/14/a-circular-economy-in-the-netherlands-by-2050>
- OVAM, 2018. *Environmental profile of building elements*, <https://www.totem-building.be>
- Pomponi F., Moncaster A., 2017. "Circular economy for the built environment: A research framework", *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710–718.
- EN 15978:2011. *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method*
- EN 16309:2014+A1:2014 *Sustainability of construction works. Assessment of social performance of buildings. Calculation methodology*
- EN 16627:2015. *Sustainability of construction works - Assessment of economic performance of buildings - Calculation methods*
- Van Gemert S.M.J., 2019. *MPG-ENVIE a BIM-based LCA application for embodied impact assessment during the early design stages*. MASTER thesis of Eindhoven University of Technology.



2.2 Studi LCA per la progettazione e applicazione di Tecnologie Reversibili

Per attivare strategie circolari nella costruzione, gestione e dismissione degli edifici, è fondamentale poter attingere a un repertorio di Tecnologie Reversibili¹, che favoriscano la smontabilità e separabilità dei componenti e il loro riuso e riciclo. Le Tecnologie Reversibili applicate al settore edilizio permettono di attivare strategie circolari per il recupero di sistemi costruttivi che hanno raggiunto la fine della propria vita utile (favorendo il riciclo o la rigenerazione) oppure che semplicemente vengono dismessi per obsolescenza funzionale o rinnovamento di immagine, ma sono ancora dotati di qualità residue e possono essere destinati a una nuova vita (riuso). Tali sistemi, in genere prefabbricati e disassemblabili, se reimmessi in nuovi cicli di vita permettono di ridurre gli impatti ambientali, l'utilizzo di risorse materiali ed energetiche e la produzione di rifiuti. Per poter ottenere dei sistemi costruttivi realmente reversibili è necessario che essi siano progettati e assemblati secondo tecniche e modelli gestionali (approccio *life cycle*) tali da garantire il disassemblaggio a fine vita e il recupero secondo strategie circolari sostenibili. La verifica dell'effettiva sostenibilità ambientale di tali sistemi, e quindi di tutte le scelte progettuali e costruttive e gestionali effettuate durante il ciclo di vita, dovrebbe essere eseguita tramite strumenti LCA (*Life Cycle Assessment*), ma al momento esistono ancora rari esempi al riguardo.

Il presente testo intende dimostrare, attraverso la raccolta e l'analisi di studi LCA, l'effettiva riduzione degli impatti ambientali: dei materiali da costruzione e delle soluzioni costruttive prefabbricate rispetto a quelle convenzionali; delle tecnologie disassemblabili reversibili, che permettono a fine vita utile il recupero dei componenti, rispetto a tecnologie che comportano a fine vita la demolizione e il conferimento in discarica; e infine del riuso e della rigenerazione, piuttosto che il riciclo.

Lo scopo è quello di mettere in evidenza l'utilità degli strumenti LCA come metodo di valutazione per il controllo e la verifica delle scelte progettuali e costruttive per la realizzazione di tecnologie reversibili nel settore edilizio che permettono l'applicazione di strategie circolari.

2.2.1 Approccio life cycle e tecnologie prefabbricate reversibili

Dal rapporto Brundtland (1987), la sostenibilità e il design sostenibile sono diventati una preoccupazione crescente in tutto il mondo ed è noto che gli edifici consumano una grande quantità di risorse (energia e materiali) durante tutto il loro ciclo di vita. In effetti, le attività di costruzione hanno impatti negativi significativi sull'ambiente (Commissione Europea, 2016), come l'inquinamento dell'aria e dell'acqua e la generazione di rifiuti. Per tale motivo, il miglioramento delle prestazioni ambientali nel settore delle costruzioni richiede la diffusione di differenti metodi di progettazione e costruzione come il *Life Cycle Design* e la prefabbricazione di componenti reversibili.

¹ Caroli T., 2022. *Reverso. Reversible Technologies towards reusing, remanufacturing and recycling*, Tesi di dottorato, supervisors: Prof. Andrea Campioli, Prof. Monica Lavagna, Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering, XXXIV cycle, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.

Tecla Caroli

Architetto, PhD presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team.
E-mail: tecla.caroli@polimi.it

Negli ultimi anni, la progettazione del ciclo di vita è stata promossa implementando la progettazione per lo smontaggio e la decostruzione (*Design for Disassembly - DfD*) di sistemi costruttivi prefabbricati per facilitare il riutilizzo, la rigenerazione e il riciclaggio di componenti e materiali da costruzione a fine vita utile (Jaillon et al. 2014). Oggi tali soluzioni offrono un'opzione per risolvere situazioni particolari, come fornire rifugio temporaneo in occasioni di emergenza, oppure situazioni che richiedono un alto livello di adattabilità e flessibilità, come le sedi per eventi fieristici o per uffici e retail con tempi di rinnovo (immagine e conformazione interna) molto brevi. Sistemi costruttivi reversibili ma durevoli permettono di essere recuperati secondo diverse strategie circolari, reimmettendo in nuovi cicli di vita componenti diventati magari obsoleti a livello funzionale (fine vita utile), ma non ancora considerabili rifiuti (fine vita) date le loro qualità residue.

Tradizionalmente, veniva definito prefabbricato un edificio costituito da componenti che venivano consegnati in sito già fabbricati e, sebbene questo sia ancora il principio di base, l'evoluzione dei sistemi di costruzione ha aperto una gamma molto più ampia di possibilità. I progressi tecnologici hanno consentito l'uso di materiali molto leggeri e hanno semplificato il processo di costruzione. Se in passato l'applicazione di sistemi stratificati a secco su strutture leggere era relegata a settori di nicchia o specializzati (negozi, ospedali, edifici terziari), oggi l'estensione dei campi di applicazione di questa tecnica costruttiva e quella tipologica, funzionale ed estetica, consentono di comprendere tutte le potenzialità e di evidenziare le caratteristiche distintive e le possibili chiavi d'azione verso un approccio sostenibile.

Per garantire l'efficiente uso delle risorse e la verifica delle ricadute ambientali delle scelte progettuali e costruttive occorre utilizzare un metodo di valutazione che tenga conto dell'intero ciclo di vita dell'oggetto in esame. Nonostante il grado di incertezza presente in tali valutazioni a causa delle differenti assunzioni sul reperimento dei dati utilizzati che non rispondono all'estesa gamma di soluzioni tecnologiche presenti, l'approccio al ciclo di vita e in particolare la valutazione LCA (*Life Cycle Assessment*) risulta utile e fondamentale per l'analisi della sostenibilità ambientale (EC JRC, 2017).

Questo contributo intende dimostrare in che modo lo strumento LCA possa indirizzare verso un approccio *life cycle* le scelte progettuali e costruttive che riguardano le tecnologie reversibili e il recupero dei componenti alla fine della loro vita utile.

2.2.2 Studi LCA di soluzioni costruttive

Soluzioni costruttive: prefabbricate vs convenzionali

La prefabbricazione è riconosciuta come una soluzione per ridurre gli impatti ambientali durante le fasi di progettazione e costruzione degli edifici. I vantaggi includono una maggiore efficienza dei processi di costruzione (Mao et al., 2013), la riduzione della manodopera in loco (Kamali et al., 2016), il miglioramento della salute e sicurezza sul lavoro (Tam et al., 2006), una migliore qualità degli edifici (Cao et al., 2015) e la riduzione dei rifiuti e dell'impatto ambientale (Hong et al., 2016; Jaillon et al., 2009).

La prefabbricazione non è però una fase del ciclo di vita riconosciuta nella valutazione LCA. È normalmente considerata parte delle fasi di produzione e/o costruzione (Pan et al., 2017). Gli impatti prodotti durante questa fase sono quindi implicitamente prese in considerazione o incorporate altrove nel ciclo di vita dell'edificio.

Gli studi LCA analizzati si concentrano principalmente sulla produzione dei componenti, sul consumo di energia durante la fase d'uso e sulla gestione dei rifiuti durante il fine vita degli

edifici. La costruzione in loco o l'assemblaggio di componenti prefabbricati sono spesso trascurati o modellati in modo incompleto (Bilec et al., 2010), portando ad una lacuna nella comprensione dell'intero spettro di possibili fonti di impatto ambientale dal ciclo di vita delle tecnologie prefabbricate piuttosto che quelle convenzionali. Nonostante ciò, di seguito sono riportati studi LCA comparativi che dimostrano l'effettiva sostenibilità ambientale dei sistemi prefabbricati.

Confrontando gli impatti di CO₂ di tre modelli di edifici in calcestruzzo (totalmente prefabbricato, semi-prefabbricato e gettato in opera), Mao et al. (2013), attraverso la metodologia LCA, hanno rilevato che se si tratta di un edificio semi-prefabbricato (fondazioni e strutture gettate in opera e chiusure, partizioni e finiture prefabbricate) si ottiene una riduzione degli impatti solo del 3% rispetto ad un edificio convenzionale, mentre per gli edifici totalmente prefabbricati la riduzione può variare dal 5% al 22%. Lo scarto dipende infatti dalla composizione del materiale utilizzato e dal trasporto. In particolare, valutando gli impatti legati ai materiali utilizzati (calcestruzzo, cemento, laterizio, acciaio, vetro e sabbia) e assumendo 1000 m² di edificio come unità funzionale, il calcestruzzo risulta essere il materiale con un incidenza maggiore: 56% in un edificio semi-prefabbricato e 49% in un edificio convenzionale.

La comparazione di 23 casi studio (residenze, scuole, uffici e retail) parzialmente (25-50%) o totalmente prefabbricati (100%) effettuato da Teng (2018) ha dimostrato che la riduzione di impatti di carbonio maggiore (quasi del 16% per le emissioni di *embodied carbon* e del 3% per le emissioni di *operational carbon*) è ottenuta grazie a sistemi totalmente prefabbricati.

Aye et al. (2012) hanno valutato le prestazioni ambientali delle costruzioni prefabbricate in acciaio in Australia e sostengono che, a condizione che i materiali vengano riutilizzati al termine della durata di 50 anni di vita utile dell'edificio, i componenti prefabbricati in acciaio possono comportare una riduzione significativa di energia incorporata, rispetto alla tradizionale costruzione in calcestruzzo. Se l'energia utilizzata per la produzione di componenti prefabbricati in acciaio è maggiore del 50% o del 10% se si tratta di una struttura ibrida acciaio (travi e pilastri) e legno (solai), rispetto ad edificio in calcestruzzo, durante il fine vita è possibile ottenere un risparmio dell'energia totale del 81%, grazie al recupero dei componenti (strutture, chiusure e partizioni) da riutilizzare per un nuovo edificio. Ciò può

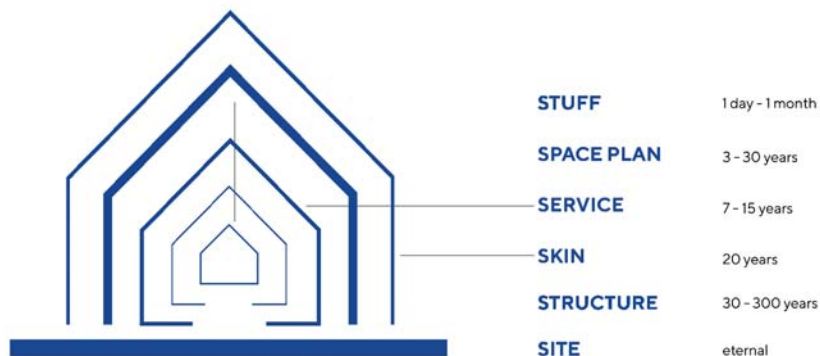


Figura 2.2.1 "Layers of Change": suddivisione dei componenti dell'edificio in 6 livelli. Fonte: Brand S., 1994.

comportare una significativa riduzione dei rifiuti conferiti in discarica e dell'utilizzo di ulteriore materiale (-51% in termini di peso).

La scelta dei materiali incide inoltre sugli impatti legati al trasporto. Alcuni studi effettuati (Mao et al., 2013; Achenbach et al., 2018) sul ciclo di vita di edifici prefabbricati affermano che il trasporto sia la fase che incide di più dopo la fase di produzione ed uso. L'analisi evidenzia che le fasi di trasporto che hanno un'incidenza maggiore sono quelle relative al trasporto di materiali dal luogo di reperimento all'azienda di produzione e fabbricazione (incidenza di circa il 20%) e il trasporto dei componenti prefabbricati in cantiere (15%).

Gli studi LCA presentati oltre a dimostrare l'effettiva sostenibilità dell'uso di tecnologie prefabbricate, permettono anche di affermare che per ottenere l'ottimizzazione degli impatti ambientali relativi all'intero ciclo di vita degli edifici prefabbricati è necessario scegliere materiali locali, durevoli e leggeri e aziende di produzione vicine al luogo di costruzione.

Fine vita: disassemblaggio vs demolizione

Un'ulteriore riduzione degli impatti ambientali è ottenibile pianificando cicli chiusi (*closing-loop cycles*) che permettono il recupero dei materiali e dei componenti riducendo non solo il consumo di risorse ma anche la produzione di rifiuti.

Kibert (2008) ha suggerito le regole fondamentali per attuare un processo costruttivo a circuito chiuso: gli edifici devono essere disassemblabili; i componenti devono essere smontabili; e, infine, i materiali devono essere recuperabili. Tenendo conto di tali regole, la reversibilità è stata identificata come il mezzo necessario per promuovere processi edilizi a circuito chiuso (Durmisevic, 2019). Le tecnologie reversibili sono quindi fondamentali per il disassemblaggio e il recupero dei componenti a fine vita per ridurre al minimo le emissioni. Testimonianza di tale riduzione è lo studio LCA comparativo effettuato da Eckelman et al. (2018) in cui sono stati messi a confronto 8 edifici in calcestruzzo e acciaio, 7 progettati per essere disassemblabili (DfD) e recuperati a fine vita utile e 1 costituito da tecnologie costruttive convenzionali che permettono solo la demolizione e il conferimento in discarica a fine vita. È stato possibile verificare che gli edifici DfD costituiti da materiali durevoli e componenti disassemblabili permettono di attivare fino a tre cicli di recupero (definiti

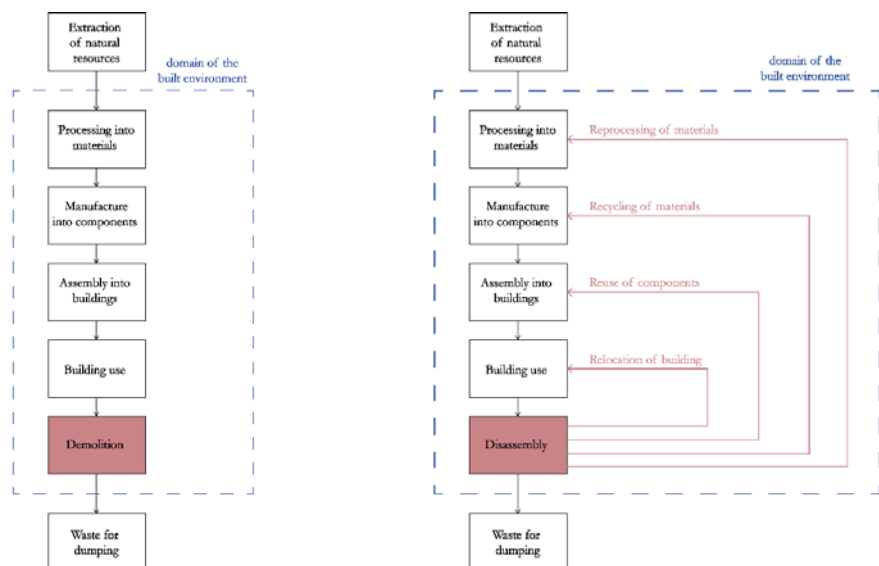


Figura 2.2.2 Confronto tra modelli di business lineari e circolari. Fonte: Crowther, 2005.

dall'articolo in maniera generale con il termine "riuso") che determinano una riduzione degli impatti ambientali che varia dal 60% al 70% rispetto ad un edificio convenzionale. Come già accennato in precedenza tale variazione dipende dalla composizione dei materiali utilizzati (es. contenuto di riciclato), dal metodo di fabbricazione (prefabbricati parzialmente o totalmente), dal trasporto dei materiali e dei componenti, dal metodo di assemblaggio dei componenti che permette l'attivazione di differenti strategie circolari.

La progettazione per lo smontaggio si è rivelata una condizione necessaria ma non sufficiente per ridurre al minimo gli impatti a fine vita: la fase di progettazione non dovrebbe essere limitata alla selezione appropriata dei materiali e dei componenti, ma deve anche prevedere un secondo utilizzo degli stessi alla fine della prima vita utile. La previsione di una nuova vita per l'edificio ridurrebbe i valori di diverse categorie di impatto ambientale fino al 40% (Arrigoni et al., 2018). Al contrario, se il secondo uso non è pianificato, il costo economico nell'operazione di disassemblaggio potrebbe diventare la priorità piuttosto che il recupero dei componenti.

Prolungare la vita di un edificio adattandolo alle nuove esigenze di un uso diverso può potenzialmente risparmiare materiale, energia incorporata e impatti relativi al trasporto rispetto alla nuova costruzione. Tali riduzioni sono possibili solo se l'edificio è progettato e costruito per essere disassemblato e se viene pianificato il suo intero ciclo di vita.

Strategie circolari: riuso e rigenerazione vs riciclo

Nel settore edilizio, il riciclo risulta essere la strategia di recupero più diffusa, in quanto non necessita di operazioni troppo selettive in fase di demolizione, per la lavorazione dei componenti e la produzione di un secondo prodotto che possa assumere lo stesso o uno scopo differente rispetto a quello iniziale (ISO 8887-1:2017). Altre pratiche circolari invece, come il riuso e la rigenerazione (*remanufacturing*) richiedono l'utilizzo di tecnologie reversibili per la decostruzione selettiva e il reimpiego dei componenti disassemblati per lo stesso o per scopi differenti (riuso) e con o senza interventi (es. pulitura, riparazione) di miglioramento prestazionale (rigenerazione) (Figura 2.2.2).

Il DfD svolge un ruolo chiave nel processo di recupero (Durmisevic, 2019), in cui la sequenza di programmazione del disassemblaggio, nonché i metodi di smontaggio per il recupero dei componenti, devono essere eseguiti in maniera adeguata. Inoltre, è importante conoscere in che modo un prodotto sia stato progettato per essere disassemblato per capire in fase di smontaggio in che modo esso possa essere mantenuto il più possibile integro e poi recuperato (Tabella 2.2.1), in quanto se il componente viene assemblato a secco, il disassemblaggio non è sempre reversibile e, a volte, lo stato del componente una volta disassemblato non consente

| opportunità | vincoli |
|--|---|
| Gestione di materiali pericolosi | Aumento dei rischi per la sicurezza dei lavoratori |
| Riduzione dei rifiuti da discarica | Riduzione salute dei lavoratori |
| Nuove attività economiche per i componenti recuperati | Maggior tempo richiesto per la decostruzione |
| Conservazione delle risorse | Necessità di un deposito per i materiali recuperati |
| Rimozione di strutture Inefficienti e/o obsolete | Mancanza di modelli di business consolidati |
| Riduzione del disagio sul sito dovuto alla demolizione | Mancanza di Norme tecniche per i materiali recuperati |

Tabella 2.2.1: Opportunità e Vincoli del DfD in edilizia. Fonte: Guy et al., 2016.

il riutilizzo o la rigenerazione che, rispetto al riciclaggio, hanno minori impatti ambientali ed economici (Singh et al., 2016).

Comparando gli impatti relativi a sistemi edilizi costituiti da componenti disassemblabili e riutilizzati piuttosto che di nuova produzione, è possibile ottenere una riduzione degli impatti durante l'intero ciclo di vita fino al 40% (Assefa et al., 2017, Eberhardt et al., 2019, Krystofik et al., 2018) in base al sistema costruttivo (strutture, partizioni interne, rivestimenti esterni e interni e arredi) considerato.

Inoltre confrontando l'applicazione di diverse strategie circolari (riuso, riciclo e rigenerazione) per il reimpiego di componenti edilizi (involucri, arredi, partizioni interne) a fine vita utile, il riciclo risulta essere sempre quello ambientalmente sfavorevole:

- il riuso permette una riduzione degli impatti relativi alle emissioni di CO₂ del 53% rispetto al riciclo (Rasmussen et al. 2019);

- la rigenerazione utilizza il 18% in meno di energia rispetto al riciclo (Eberhardt et al., 2019).

Lo studio effettuato da Assefa et al. (2017) sugli scenari di recupero di riuso e rigenerazione di un edificio DfD, mostra una potenziale riduzione che varia tra il 20 e il 40%, in sei delle sette categorie ambientali valutate. La riduzione più alta si ottiene per l'eutrofizzazione pari al 37%, seguita dall'acidificazione (29%). Le emissioni di anidride carbonica e il consumo di combustibili fossili mostrano un impatto evitato rispettivamente del 33% e del 34% a seguito della decisione di ricorrere alla decostruzione selettiva piuttosto che alla demolizione completa e alla nuova costruzione. La riduzione di ozono presente nella stratosfera è stata l'unica categoria di impatto che non è stata fortemente influenzata dal riutilizzo degli edifici (riduzione del 2%).

I dati riassunti in Tabella 2.2.2 dimostrano quanto sia essenziale progettare e costruire sistemi effettivamente reversibili per poter attivare processi circolari a fine vita utile di un edificio e dei suoi componenti. Inoltre, risulta evidente come il riuso e la rigenerazione siano

| autori | S-layer | strategia circolare | unità funzionale | confini di sistema | risultati |
|-----------------------|----------------------------|--|--|---|--|
| Assefa et al. 2017 | Structure Skin Space | riuso riciclo | Intero edificio | Fasi di produzione e costruzione (A1-A5) | Riduzione dal 20% al 37% degli impatti di componenti disassemblati per essere riutilizzati rispetto a quelli riciclati |
| Eberhardt et al. 2018 | Structure Skin Space | riuso | 1 m ² di superficie di edificio | Fasi di produzione, uso, fine vita e benefici (A1-A3, B4,B6, C3, C4, D) | Riduzione degli impatti del 21% rispetto ad un edificio nuovo |
| Krystofik et al. 2018 | Stuff | rigenerazione adattiva rigenerazione | una postazione di lavoro | Fase di produzione (A1-A3) | Riduzione del consumo di energia del 18% rispetto a componenti nuovi |
| Rasmussen et al. 2019 | Structure Skin Space | riuso riciclo | 1 m ² di superficie di edificio | Fasi di produzione, uso, fine vita e benefici (A1-A3, B4, C3, C4, D) | La GWP prodotta da soluzioni DfD è maggiore del 53% rispetto alle soluzioni upcycled |

Tabella 2.2.2: Confronto analisi LCA di tecnologie disassemblabili progettate per il recupero.

ambientalmente più virtuosi rispetto al riciclo, nonostante sia la strategia di recupero più utilizzate nel settore edilizio.

2.2.3 Conclusioni

Le attuali esigenze d'uso temporanee rischiano di introdurre nel settore edilizio le logiche consumistiche a breve termine tipiche dei prodotti industriali, caratterizzati da un'accelerata obsolescenza funzionale di spazi e componenti edilizi. Per contrastare questa tendenza occorrono attenzioni progettuali volte a garantire la temporaneità in una prospettiva di uso efficiente delle risorse e la verifica delle ricadute ambientali tramite la valutazione dell'intero ciclo di vita.

Nonostante risulti necessario un'implementazione e integrazione dei valori di impatti ambientali da attribuire alle diverse tipologie di componenti edilizi, alla fase di assemblaggio e di disassemblaggio dei componenti e al riconoscimento della prefabbricazione come una fase del ciclo di vita e non integrata ad altre fasi, gli strumenti LCA sono fondamentali per orientare e valutare le scelte che riguardano l'intero processo edilizio. Per i progettisti e i project manager assume un ruolo di supporto nella fase decisionale (*decision-making*) nella scelta dei materiali e delle tecnologie costruttive da utilizzare, in un contesto in cui gli edifici con ridotti impatti ambientali e a zero emissioni di CO₂ sono sempre più richiesti (es. C40 Reinventing Cities) e nella pianificazione della seconda vita dei componenti, per risolvere i problemi relativi alla gestione del fine vita di edifici temporanei (es. Padiglioni EXPO); per i produttori diventa uno strumento per verificare le prestazioni ambientali del proprio prodotto (es. EPD) ed essere maggiormente competitivi sul mercato; per gli appaltatori e gli sviluppatori immobiliari per scegliere il valore dell'immobile sul mercato attraverso parametri che non riguardano solo i tempi e i costi di costruzione (ridotti grazie all'utilizzo di elementi prefabbricati) ma anche in base alle prestazioni ambientali (Kawecki, 2010); per i committenti e gli utenti per ottenere incentivi economici facendo riferimento requisiti CAM riguardanti il contenuto di riciclato dei materiali e della percentuale di componenti disassemblati (es. Ecobonus 2020).

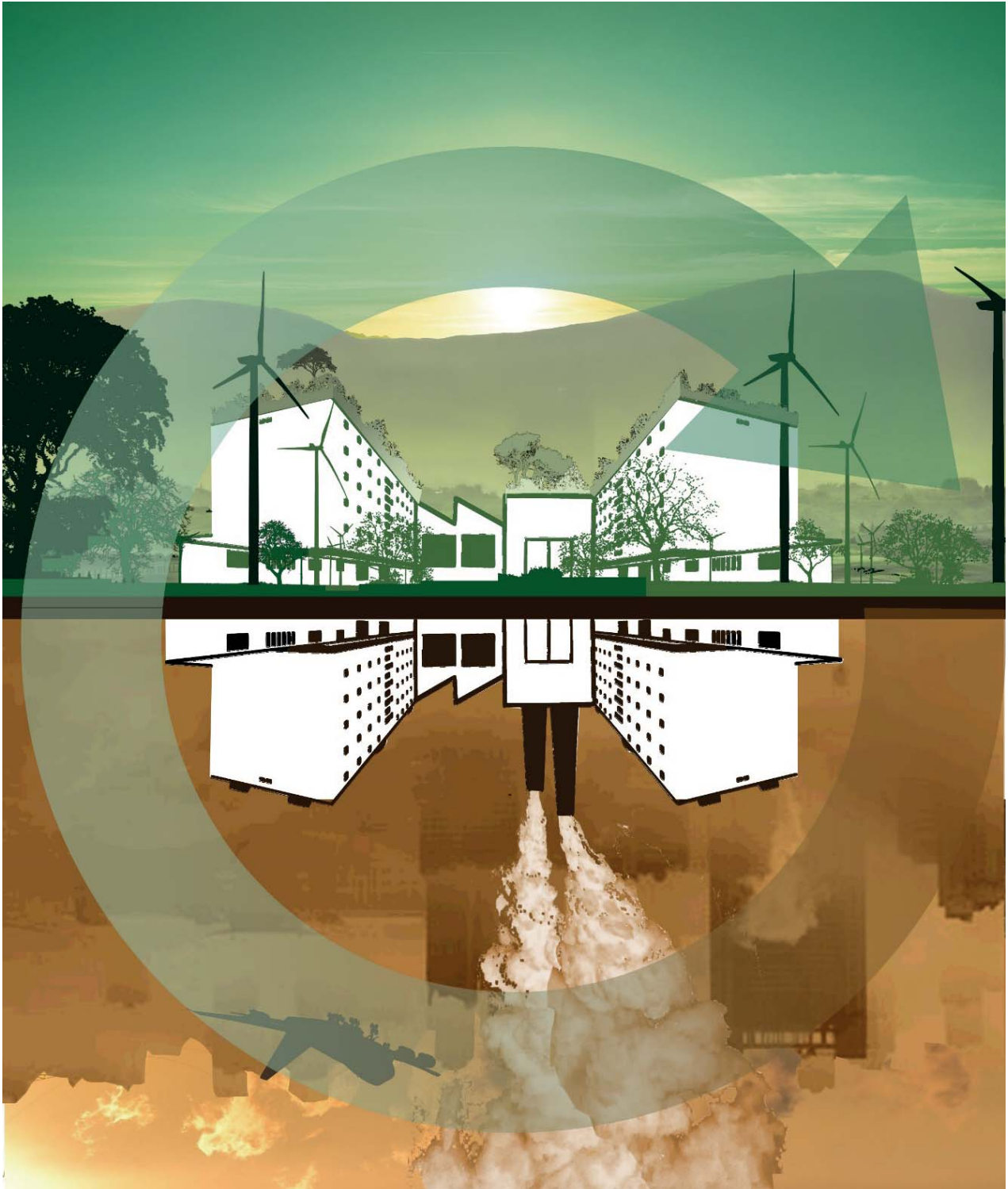
In tal senso gli edifici progettati e costruiti attraverso tecnologie reversibili devono essere maggiormente diffusi grazie all'utilizzo di un modello gestionale che tenga conto dell'intero ciclo di vita dell'edificio, che mira alla circolarità e alla sostenibilità dei materiali da costruzione e che renda maggiormente responsabili e competenti, attraverso attività di formazione e disseminazione, tutti gli operatori che fanno parte del processo per sfruttare al meglio le potenzialità di tali tecnologie.

Bibliografia

- Achenbach H., Wenker J.L., Rüter S., 2018. "Life cycle assessment of product and construction stage of prefabricated timber houses: a sector representative. Approach for Germany according to EN 15804, EN 15978 and EN 16485", *European Journal Wood Production*, vol. 76, pp. 711-729.
- Arrigoni A., Zucchinelli M., Collatina D., Dotelli G., 2018. "Life cycle environmental benefits of a forwards-thinking design phase for buildings; the case study of a temporary pavilion built for an international exhibition", *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, pp. 974-983.

- Assefa G., Ambler C., 2017. "To demolish or not to demolish: Life cycle consideration repurposing buildings", *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, pp. 146-153.
- Aye L., Ngo T., Crawford R., Gammampila R., Mendis P., 2012. "Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules", *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 159–168.
- Bilec M.M., Ries R.J., Scott Matthews S., Asce A.M., 2010. "Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Processes for Buildings", *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 16(3), pp. 199-205.
- Cao X., Li X., Zhu Y., Zhang Z., 2015. "A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China", *Journal of Cleaner Production*, vol. 109, pp.131-143.
- Commissione Europea, 2006. *Environmental impact of products (EIPRO) – Analysis of the life cycle environmental impact related to the final consumption of the EU-25*. Spain: Joint Research Centre.
- Durmisevic E., 2019. *Circular economy in construction: Design strategies for reversible buildings*, BAMB, Netherlands.
- Eberhardt L.C.M., Birgisdottir H., Birkved M., 2019. "Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings", proceedings of WMCAUS 2018, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 471.
- EC JRC, European Commission, Joint Research Center, 2017. *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Eckelman M.J., Brown C., Troup L.N., Wang L., Webster M.D., Hajjar J.F., 2018. "Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings", *Building and Environment*, vol. 143, pp. 421-430.
- Gorgolewski M., 2008. "Designing with reused building components: some challenges", *Building Research and Information*, vol. 36, pp. 175–188.
- Hong J., Shen G.Q., Mao C., Li Z., Li K., 2016. "Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an input–output-based hybrid model", *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2198–2207.
- ISO 8887-1:2017. *Technical product documentation — Design for manufacturing, assembling, disassembling and end-of-life processing — Part 1: General concepts and requirements*
- Jaillon L., Poon C.S., Chiang Y., 2009. "Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong", *Waste Management*, vol. 29, pp. 309–320.
- Jaillon L., Poon C.S., 2014. "Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong", *Automation in Construction*, vol. 39, pp. 195-202.
- Kamali M., Hewage K., 2016. "Life cycle performance of modular buildings: a critical review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1171–1183.
- Kawecki L.R., 2010. *Environmental Performance of Modular Fabrication: Calculating the Carbon Footprint of Energy Used in the Construction of a Modular Home*, PhD Thesis, Arizona State University, December 2010.
- Kibert C.J., 2008. *Sustainable Construction, Green building Design and Delivery*, John Wiley & Sons New Jersey, USA.
- Krystofik M., Luccitti A., Parnell K., Thurston M., 2018. "Adaptive Remanufacturing for multiple lifecycles: a case study in office furniture", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 135, pp. 14-23.

- Mao C., Shen Q., Shen L., Tang L., 2013. "Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: two case studies of residential projects", *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 165–176.
- Pan W., Li K., Teng Y., 2017. "Life-cycle carbon assessment of prefabricated buildings: challenges and solutions", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Engineering Sustainability.
- Rasmussen F.N., Birkved M., Birgisdóttir H., 2019. "Upcycling and Design for Disassembly – LCA of building employing circular design strategies", Proceedings of SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 225.
- Singh J., Ordonez I., 2016. "Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy", *Journal of Cleaner Production*, vol. 134, pp. 342-353.
- Tam V.W., Tam C., Chan J.K., Ng W.C., 2006. "Cutting construction wastes by prefabrication", *International Journal of Construction Management*, vol. 6, pp. 15–25.
- Teng Y., Kaijian L., Pan W., Ng T., 2018. "Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: evidence from and gaps in empirical studies", *Building and Environment*, vol. 132, pp. 125-136.



2.3 La circolarità nell'industria: Life Cycle Design per l'innovazione di prodotto e processo

Il rapporto tra il mondo dell'industria e l'ambiente, ha certamente radici lontane, che risalgono al momento in cui il processo di produzione su larga scala ha influito sensibilmente sul bilancio mondiale dell'uso di risorse. Alla fine dell'Ottocento gli effetti della diffusione della produzione industriale determinò una trasformazione radicale del mercato delle materie prime, con un consumo progressivo di materiali provenienti da fonti non rinnovabili. Gli effetti furono evidenti da subito sull'ambiente: famoso fu il caso della falena Biston Betularia, la quale nella sua forma comune ha un colore chiaro per mimetizzarsi sugli alberi di betulla coperti da licheni di colore chiaro, mentre dalla metà dell'Ottocento, in prossimità dei centri urbani, cominciò a comparirne una variante scura adattata ad un ambiente la cui fuliggine copriva anche le superfici dei tronchi d'albero.

Effetti sull'ambiente e sulla salute hanno determinato via via una presa di coscienza circa la necessità di operare un cambiamento nel sistema di produzione industriale di larga scala, così, sin dagli anni '60 si cominciarono a valutare metodi e procedure che fossero in grado valutare gli impatti ambientali di processi produttivi industrializzati. Harold Smith già nel 1963 presentò alla conferenza mondiale per l'energia il suo metodo per il calcolo dei fabbisogni energetici cumulativi per la produzione di prodotti chimici mentre nei famosi testi *The Limits to Growth* (Meadows et al., 1972) e *A Blueprint for Survival* (Goldsmith et al., 1972) si evidenziarono gli studi previsionali sugli effetti a scala mondiale del consumo di risorse energetiche e di materie prime.

Certamente anche il mondo industriale cominciò ad aprirsi alla possibilità di processi produttivi più ecosostenibili, intuendo altresì che il tema del risparmio di materie prime avrebbe determinato anche vantaggi economici. Nel 1969 la Coca Cola incarica il Midwest Research Institute di condurre uno studio nel quale si valutasse il costo ambientale di differenti tipologie di contenitori per bevande, tenendo conto dell'uso di risorse, emissioni e rifiuti prodotti delle rispettive fasi di produzione (Guinée et al., 2011).

Gli anni successivi furono caratterizzati da un progressivo diffondersi e consolidarsi di metodi di valutazione d'impatto ambientale, passando dall'analisi a scala di prodotto, finalizzata allo studio delle materie prime e della produzione, all'analisi a scala di sistema, che prevede invece un approccio olistico incentrato su tutte le fasi del ciclo di vita. Se è vero che il settore della ricerca ha raffinato e migliorato le procedure, è pur vero che negli anni il consumo di risorse e il conseguente livello di inquinamento a scala mondiale è andato incrementandosi: il WMO (World Meteorological Organization) a settembre 2019 ha sottolineato che i risultati delle ultime analisi ambientali indicano un aumento di 1,1°C della temperatura media globale (periodo 2015-2019) rispetto a quella pre-industriale.

Proprio a causa della minaccia del cambiamento climatico, il sistema economico, soggetto a spinte innovatrici, si sta evolvendo verso un approccio circolare che non si limita al solo efficientamento energetico, ma interviene in maniera più sistemica sin dal processo progettuale, al fine di ridurre l'uso di risorse minimizzando la produzione di rifiuti.

Corrado Carbonaro

Docente e collaboratore presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design.
E-mail: corrado.carbonaro@polito.it

È il progetto stesso che già prevede di massimizzare l'ecocompatibilità dei materiali, dei processi di produzione, la separabilità dei sub-sistemi e la riciclabilità degli stessi. In questo processo di trasformazione un ruolo determinante lo stanno giocando le aziende produttrici di materiali e componenti per l'edilizia, che nell'ultimo decennio hanno concorso ad innovare l'offerta di prodotti da costruzione. In questa direzione per il comparto manifatturiero italiano sono stati condotti studi finalizzati all'innovazione e ricerca, all'accesso al "Green market" e all'adeguamento alle norme con requisiti ambientali cogenti e volontari. A seconda dell'obiettivo gli studi del ciclo di vita (LCA) hanno assunto i caratteri di semplici valutazioni, oppure veri propri processi di innovazione di prodotto o filiera produttiva, frutto di un processo analitico e progettuale sinergico (Figura 2.3.1).



Figura 2.3.1 Schema delle tipologie di studio ambientale LCA e dei relativi obiettivi nel caso di analisi del ciclo di vita per un'azienda industriale.

2.3.1 Green Economy e Industria 4.0

Uno dei motivi principali per le aziende per ricorrere a analisi ambientali dei loro prodotti è certamente quello di potersi qualificare quali aziende "green". Il mercato dei prodotti e dei servizi ad alta qualità ambientale è certamente un mercato in forte espansione, soprattutto nell'ultimo decennio allorché il trend economico tradizionale ha subito forti contrazioni.

La *green economy*, il cui primo impulso è stato determinato dalla diffusione delle fonti rinnovabili e dell'efficientamento energetico, è cresciuta negli ultimi anni anche nei settori delle tecnologie eco-compatibili e dei materiali di riciclo. Le motivazioni risiedono nella diffusione di regole più stringenti in termini di sostenibilità, ma anche di una maggior attenzione da parte sia dell'utenza sia dei produttori.

L'Europa sta giocando un ruolo da protagonista nell'applicazione e sostegno dei principi dell'economia circolare mettendo in campo *policy* per il lancio di settori industriali ambientalmente responsabili. Nel 2017 l'Italia, dopo Lussemburgo e Irlanda, è risultata il terzo paese in Europa per indice composito di eco-efficienza: misura indicativa del livello

di impatto ambientale delle economie europee attraverso l'analisi di indicatori di efficienza energetica, dell'uso dei materiali e rifiuti e delle emissioni prodotte (GreenItaly, 2019).

Il comparto produttivo industriale ha giocato certamente un ruolo fondamentale in tale successo: al 2017 per l'Italia la quantità di input produttivi per generare un milione di euro di valore è sceso a 285,9 tonnellate dimezzando quasi il valore del decennio precedente. L'Italia, che è il secondo paese manifatturiero dell'Europa, ne è oggi il paese con il più basso consumo pro-capite di materiali. Il rapporto GreenItaly evidenzia infatti che "per ogni kg di risorsa consumata, l'Italia genera –a parità di potere d'acquisto (PPS)– 3,5 € di Pil, contro una media europea di 2,2 e valori di 2,3 della Germania o di 2,7 della Francia", avendo al contempo il più alto tasso di riciclo di materia sul totale dei rifiuti (73%).

Le aziende italiane dimostrano un progressivo incremento degli investimenti nel settore ambientale: nel 2019 le imprese che hanno investito in azioni circolari sono il 21,5% del totale. Tra le imprese italiane il comparto industriale ha tassi di investimenti previsti del 34,4%, mentre per il settore delle costruzioni il valore si attesta attorno del 32%. Ciò si è tradotto anche in una maggior propensione e capacità d'innovazione: il 79 % delle aziende che investono nel *green* hanno svolto anche azioni d'innovazione (il 18% in più di quelle che non hanno attuato politiche ecosostenibili). La tendenza ad investire sulla sostenibilità ambientale incide inoltre sull'occupazione, sul fatturato e sull'Export (Figura 2.3.2).

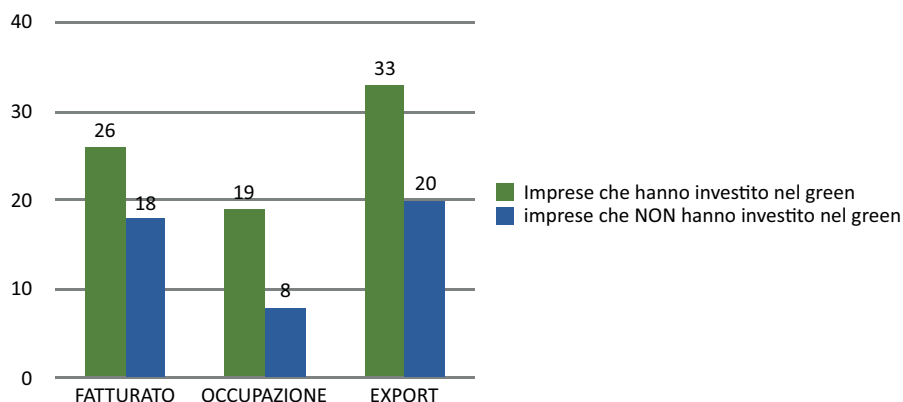


Figura 2.3.2 Performance previsionali per il 2019 delle imprese che hanno investito in prodotti (Green Italy ,2019).

Le aziende che hanno una propensione a modelli industriali circolari, hanno la necessità di aggiornare e innovare non solamente i loro processi produttivi, ma il loro intero sistema di business, il che comporta ingenti investimenti e nuovi approcci al mercato. A supporto dei nuovi investimenti, una delle risorse che è stata messa in campo nell'ambito europeo è il programma denominato "Industria 4.0", il quale prevede il supporto alle imprese che hanno intenzione di implementare i sistemi produttivi.

Industria 4.0 prende il nome dall'iniziativa europea Industry 4.0, a sua volta ispirata ad un progetto del governo tedesco. L'Italia con il programma "Industria 4.0", poi sostituito da Impresa 4.0 ed ora da transizione 4.0, ha stanziato un quantitativo ingente di fondi per la diffusione dei sistemi IOT nell'industria, per l'aggiornamento dei macchinari con maggior produttività a fronte di maggiori efficienze, per lo sviluppo di modelli di business e processi produttivi ecosostenibili e circolari.

Il grado di innovazione che supporta tale misura incentivante, richiede quindi di rivedere i processi produttivi con l'utilizzo di nuove tecnologie che possono trasformare la relazione tra

produzione e consumo così come l'organizzazione ed il controllo dei processi produttivi interni all'impresa e nelle filiere. La digitalizzazione determina un passo in avanti rilevante per la diffusione di modelli di economia circolare attraverso: l'ottimizzazione del consumo di risorse, la riduzione di sprechi energetici e materici, abilitare la progettazione e la simbiosi industriale ottenuta attraverso una gestione integrata e istantanea tra i nodi produttivi di filiera.

Se da un lato le nuove tecnologie 4.0 permetteranno una gestione e controllo integrati, dall'altro lato il progetto di filiera produttiva e di prodotto dovranno ricorrere ai metodi scientifici e rigorosi del *Life Cycle Design* e della *Life Cycle Assessment*. L'analisi dei dati dovrà certamente avvenire alla luce di sistemi di valutazione quantitativi dei flussi di materia ed energia in ingresso e uscita da ogni processo industriale sia in senso predittivo (il progetto dell'innovazione di filiera deve necessariamente passare da un bilancio previsionale di convenienza economica ambientale) sia per la verifica delle fasi di produzione (la sensoristica e l'IOT daranno finalmente la possibilità di accedere a dati primari di produzione puntuali e disaggregati). In effetti alcuni studi hanno dimostrato che l'incremento di efficienza non sempre comporta una riduzione d'uso di risorse: macchinari che aumentano la produttività spesso ne aumentano anche i consumi energetici. Inoltre è da considerare il possibile *rebound effect* relativo all'aumento dei consumi a seguito di una maggior efficienza dei sistemi produttivi (Saunders H.D., 1992).

L'indagine di Legambiente in collaborazione con l'Università di Padova del 2018 denominata "L'economia circolare nelle imprese italiane e il contributo di Industria 4.0" ci mostrano come le imprese che investono in economia circolare puntano in primis alla riduzione dei rifiuti e degli sprechi (l'85% delle attività di implementazione ambientale è andata in questa direzione), mentre il 59,3% delle imprese ha investito nel riutilizzo degli scarti all'interno del proprio ciclo produttivo. Il processo di trasformazione ecosostenibile delle industrie, attraverso un'attenta e scientifica valutazione e progettazione ambientale, sembra confermare delle ricadute estremamente positive, come dimostra l'immagine in Figura 2.3.3.

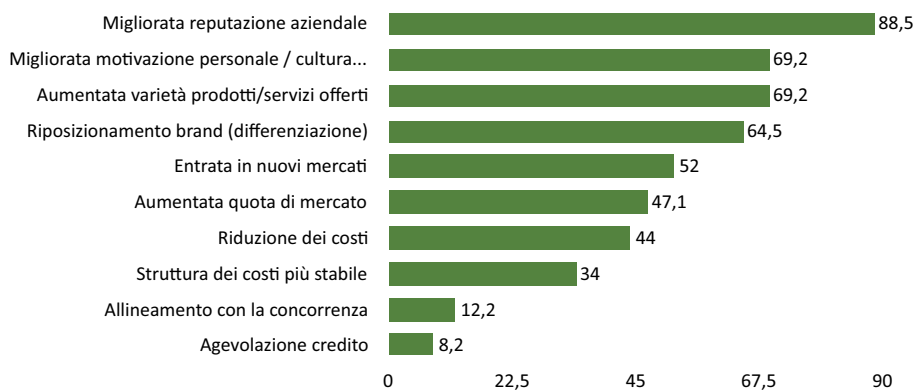


Figura 2.3.3 Importanza dei benefici che le aziende hanno riscontrato con l'adozione di un modello di business circolare (Legambiente e Università di Padova, 2018)

2.3.2 Nuove regole per il GPP e requisiti minimi ambientali (CAM)

La Commissione Europea nel documento COM (2011) 363 del 20 giugno 2011 definisce la *Green Economy* come una parte dell'economia che garantisce crescita in termini di lavoro e di volume di affari "investendo e salvaguardando le risorse del capitale naturale da cui dipende la sopravvivenza del nostro pianeta".

A testimonianza di come l'Unione Europea promuova le strategie circolari dell'economia, nel 2016 pubblica la guida *Buying Green – A handbook on green public procurement, third edition*, nella quale si definisce il *Green Public Procurement* come un motore importante per stimolare il mercato dei prodotti ecocompatibili ed innescare il cambiamento nel comparto produttivo europeo.

L'Italia è il paese che per primo coglie tale invito e con il decreto 11/04/2008 introduce i requisiti minimi ambientali (CAM), adottando il piano di azione nazionale per il *Green Public Procurement* e il D. L. 19 aprile 2017 n. 5. I CAM sono quindi imposti negli appalti pubblici per una quota progressiva fino al 100% al 2020, coinvolgendo la progettazione di edifici pubblici, arredi urbani (DM 5/02/2015), illuminazione pubblica (DM 27/09/2017 e DM 28/03/2018) e verde pubblico (DM 13/12/2013). Essi premiano in particolare quei prodotti o servizi caratterizzati dall'utilizzo di materiali riciclati certificati e apparecchi ad alta efficienza e a basso consumo di energia.

Nel caso dei "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici" è necessaria la verifica del contenuto di materia riciclata o la sostenibilità ambientale di prodotto riguardo a 11 categorie dei materiali da costruzione.

Ad esempio i calcestruzzi devono contenere una quantità di materiale riciclato (sul secco) di almeno il 5% sul peso del prodotto. L'acciaio per usi strutturali deve contenere una percentuale di materia prima seconda pari al 70% se acciaio da forno elettrico o del 10% se acciaio da ciclo integrale. Per le materie plastiche il contenuto di materia riciclata o recuperata deve essere pari ad almeno il 30% in peso. Tutti questi requisiti ambientali vanno dimostrati attraverso una certificazione ambientale la quale espliciti quantitativamente il contenuto di energia riciclata tramite:

- dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025 (es. EPDIItaly© o equivalenti);
- certificazione di prodotto che attesti il contenuto di riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa, come ReMade in Italy® o equivalenti (ISO 14024);
- certificazione di prodotto che attesti il contenuto di riciclato conformemente alla norma ISO 14021.

Inoltre sono presenti altri criteri minimi generali riferiti all'intero progetto, quali la disassemblabilità, per la quale almeno il 50% in peso dei componenti edilizi deve essere sottoponibile a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile.

L'Amministrazione Pubblica, pur con una norma che contiene ancora alcuni punti controversi, sta quindi contribuendo ad alimentare il mercato dei prodotti verdi, il quale richiede un notevole sforzo del comparto industriale per la riprogettazione di prodotti e processi manifatturieri (Figura 2.3.4). Il processo innovativo così radicale deve avvenire però sulla base di competenze scientifiche riconosciute e consolidate, che difficilmente sono disponibili tra gli attori del processo innescato da un appalto pubblico: l'amministratore, l'impresa di costruzione e a volte i produttori stessi, non hanno le competenze per valutare e riprogettare in chiave ecosostenibile. Gli enti di ricerca, le Università e studi con specifiche competenze ambientali, sulla base delle norme scientifiche internazionali, possono supportare il processo di innovazione e certificazione dei prodotti ricorrendo alle metodologie della *Life Cycle Assessment*. Nelle esperienze condotte tra esperti e imprese è infatti emersa una difficoltà rilevante nel collezionare dati su materiali da costruzione dotati di dichiarazione ambientale. Non esiste infatti un data base unificato di tali prodotti, ma piuttosto una costellazione di siti web degli enti di certificazione, i quali annoverano i prodotti da loro certificati.

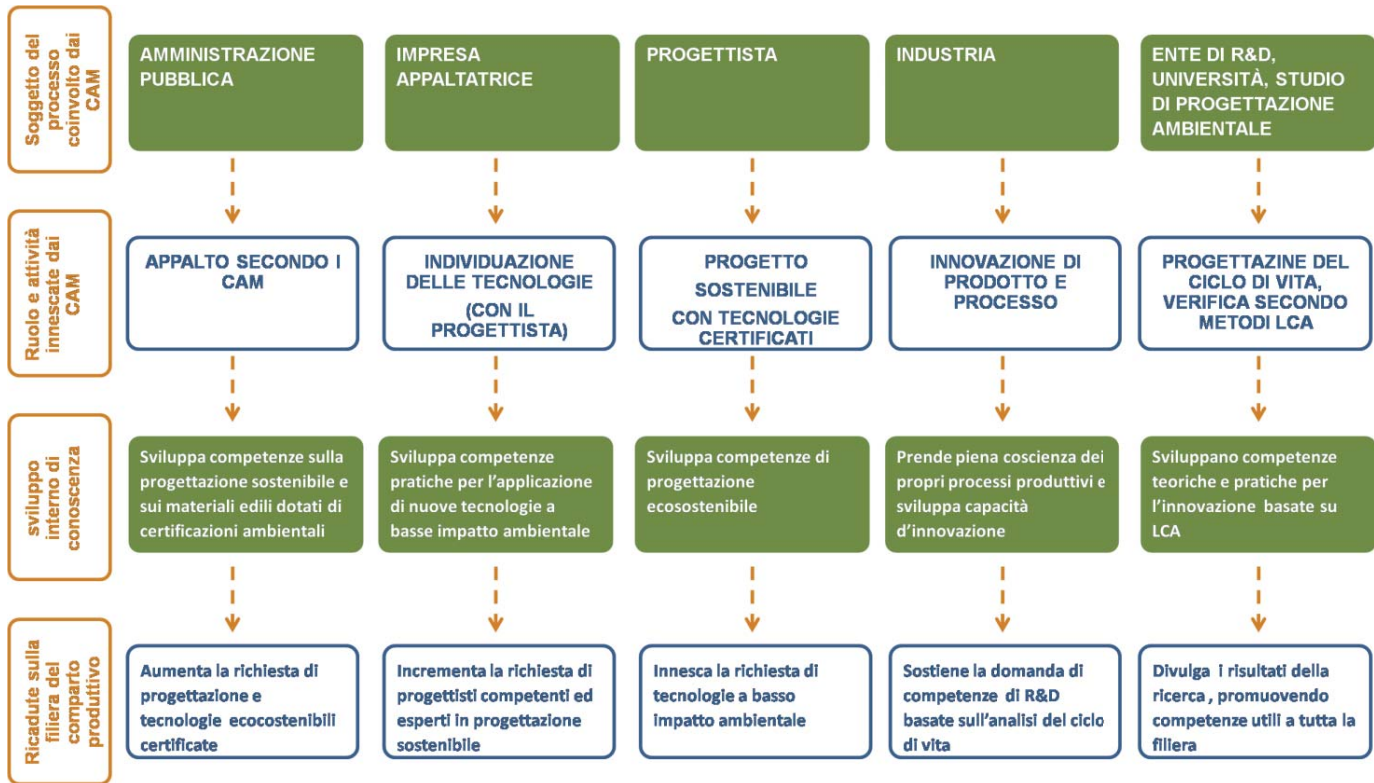



Figura 2.3.4 Le ricadute del processo del GPP e dei CAM sulla filiera del progetto.

Il progettista, deve conoscere le decine di siti nazionali e internazionali attraverso i quali ricercare i prodotti certificati utili per il progetto. Inoltre è da rammentare come la sola dichiarazione ambientale di per sé stessa non basti a garantire la rispondenza ai requisiti: è necessario verificare che il contenuto di riciclato sia in quantità sufficiente a soddisfare la norma. Saper leggere ad esempio una dichiarazione ambientale di prodotto (EPD) non è sempre semplice e presuppone una conoscenza non superficiale della teoria della LCA. Proprio con lo scopo di supportare i progettisti e le imprese nella scelta di tecnologie e materiali che rispondano ai criteri di sostenibilità ambientale (non solo per i CAM), il laboratorio LaSTIn del Dipartimento DAD in collaborazione con il professor R. Giordano ha sviluppato un database denominato "CAM_PER - database materiali e componenti edilizi ecocompatibili". Il database colleziona, ad oggi, un centinaio di prodotti da costruzione in schede contenenti dati tecnici (es. conducibilità termica, resistenza meccanica, densità), dati di ecocompatibilità (es. certificazione ambientale, % di materiale riciclato, riciclabilità) e una check-list di controllo sia per la rispondenza ai requisiti minimi ambientali di progetto, sia per la verifica della completezza della documentazione prodotta per la rispondenza ai requisiti dei bandi. L'obiettivo del database è quello di collezione materiali da costruzioni a scala regionale, nazionale o internazionale, che possano rispondere ai requisiti dei CAM, fornendo a progettisti e imprese uno strumento che possa suggerire il set di materiali da utilizzare in caso di appalti pubblici per la costruzione di edifici.

CAM_PER
DATABASE MATERIALI E COMPONENTI EDILIZI ECOCOMPATIBILI

Glass Mineral Wool 032-033 slabs
TP 132B, Cavitec 032, FACADE 032B,
KD 432, NATURBOARD 031, NATURE
with ECOSE® Technology

Knauf Insulation




Descrizione Prodotto

| Marca | Modello | Tipologia di componente | Tipologia di materiale |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| KNAUF INSULATION | Natureboard 033 | Pannello isolante | lana di vetro |

Caratteristiche tecniche

| Spessore (mm) | larghezza (mm) | lunghezza (mm) | conduttività termica W/mK | resistenza termica (m2/kW) |
|---------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|
| 50 | 560 | 1350 | 0,033 | 1,50 |
| 100 | 560 | 1350 | 0,033 | 3,00 |
| 200 | 560 | 1350 | 0,033 | 6,05 |

| Reaction to fire | Diffusion resistance factor (μ) | Air Flow Resistance (kPa.s/m ²) | Long term adsorbability (kg/m ²) | Short term adsorbability (kg/m2) |
|------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Classe A1 | 1 | > 5.0 | ≤1 | ≤3 |

Certificazione ambientale

| Tipologia certificazione | norma di riferimento | limite secondo i CAM | % di MPS | dato riscontrabile su certificato |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------------|
| TIPO III - ISO 14025 | EPD - Environdec | 60% di MPS riciclata | 82,50% | SI |

CAM_PER
DATABASE MATERIALI E COMPONENTI EDILIZI ECOCOMPATIBILI

CATEGORIA MATERIALI E COMPONENTI

- Art 2.4.2.1 CALCESTRUZZI (E RELATIVI MATERIALI COMPONENTI) CONFEZIONATI IN CANTIERE, PRECONFEZIONATI E
- Art 2.4.2.2 LATERIZI
- Art 2.4.2.3 PRODOTTI E MATERIALI A BASE LEGNO
- Art 2.4.2.4 GHISA, FERRO, ACCIAIO
- Art 2.4.2.5 COMPONENTI IN MATERIE PLASTICHE
- Art 2.4.2.6 MURATURE IN PIETREME E MISTE
- Art 2.4.2.7 TAMPONATURE, TRAMEZZATURE E CONTROSOFFITTI
- Art 2.4.2.8 ISOLANTI TERMICI E ACUSTICI
- Art 2.4.2.9 PAVIMENTI E RIVESTIMENTI
- Art 2.4.2.10 PITTURE E VERNICI
- Art 2.4.2.11 IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE PER INTERNI ED ESTERNI

Figura 2.3.5 Database CAM_PER, che colleziona le schede tecniche dei materiali rispondenti ai requisiti CAM (R.Giordano, C.Carbonaro).

La condivisione del Politecnico di Torino con aziende produttrici, imprese di costruzione e amministrazioni locali, hanno evidenziato quindi quanto sia fondamentale un processo integrato di innovazione industriale in chiave circolare, supportato però da un sistema di disseminazione e certificazione chiaro delle performance ambientali raggiunte sul mercato locale o sovra nazionale.

2.3.3 I processi di innovazione industriale e il ciclo di vita dei materiali

Come si è visto gli organi normativi, il mercato e lo stesso settore industriale stanno procedendo verso un'economia circolare, che richiede uno sforzo enorme per riprogettare la filiera produttiva. Molti sono gli esempi virtuosi di aziende che, anche in collaborazione con enti di ricerca o università, sono riusciti a innovare prodotti o sistemi di produzione, alla luce di una rilettura dei loro processi in chiave *Life Cycle*.

Anche se per la maggior parte dei casi l'approccio *Life Cycle* nell'industria, si concentra sulla fase "dalla culla al cancello", spesso però è molto utile valutare il ciclo di vita nella sua



Figura 2.3.6 Schema delle possibili applicazioni a scala industriale dell'analisi del ciclo di vita.

interezza, soprattutto per poter garantire le performance nel tempo, in relazione al prodotto medio presente sul mercato (Figura 2.3.6) L'analisi ambientale delle prime due fasi del ciclo di vita, usualmente si applica per certificare un prodotto, per cercare di abbassarne l'impatto ambientale o per sottoporlo ad un processo di innovazione.

Nelle esperienze condotte dal laboratorio LaSTIn e dal gruppo di ricerca TeAM del Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino, è emerso che spesso l'analisi LCA condotta con partner industriali mette in luce inaspettate criticità o potenzialità del processo produttivo. Nella ricerca denominata "Block-Plaster", finanziata dalla Regione Piemonte su Fondi Europei POR-FESR 2007-2013, la collaborazione con l'azienda Vincenzo Pilone, avviata al fine di realizzare un sistema di parete con laterizi innovativi, ha evidenziato come gli additivi nella miscela fossero i responsabili del 28% degli impatti, valore estremamente ridotto in caso di loro sostituzione con la lolla di riso (Figura 2.3.7).

Sempre sulla fase di produzione, l'analisi ha inoltre evidenziato che per la produzione media del laterizio, le fasi di cottura ed essiccazione occupavano il 50% delle risorse energetiche non rinnovabili, mentre il 42% dipendeva dalla fase di produzione del laterizio, compresa

di materie prime. Ciò ha spinto a costruire e valutare scenari produttivi comparativi che individuassero le fonti energetiche a minor impatto. Il risultato delle simulazioni ha sottolineato che l'eventualità di sostituire tutta l'energia elettrica della produzione con fonte rinnovabile, avrebbe dato risultati di scarso rilievo (riduzione del 2% degli impatti relativi risorse energetiche non rinnovabili) mentre la sostituzione del cogeneratore a metano con un cogeneratore a biomassa avrebbe ridotto gli impatti di CO₂ del 12% circa (Carbonaro, Thiebat, 2014). Il rapporto tra costi e benefici ambientali prodotti, ricavati dai succitati scenari, ha supportato la proprietà nelle possibili scelte future sul sistema di produzione.

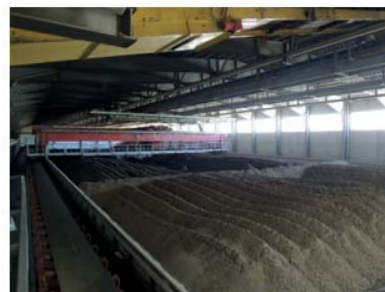
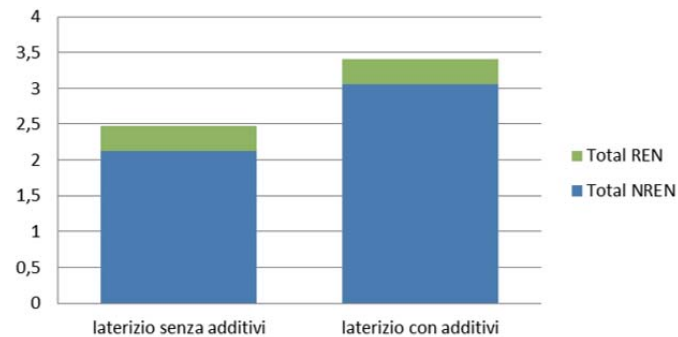
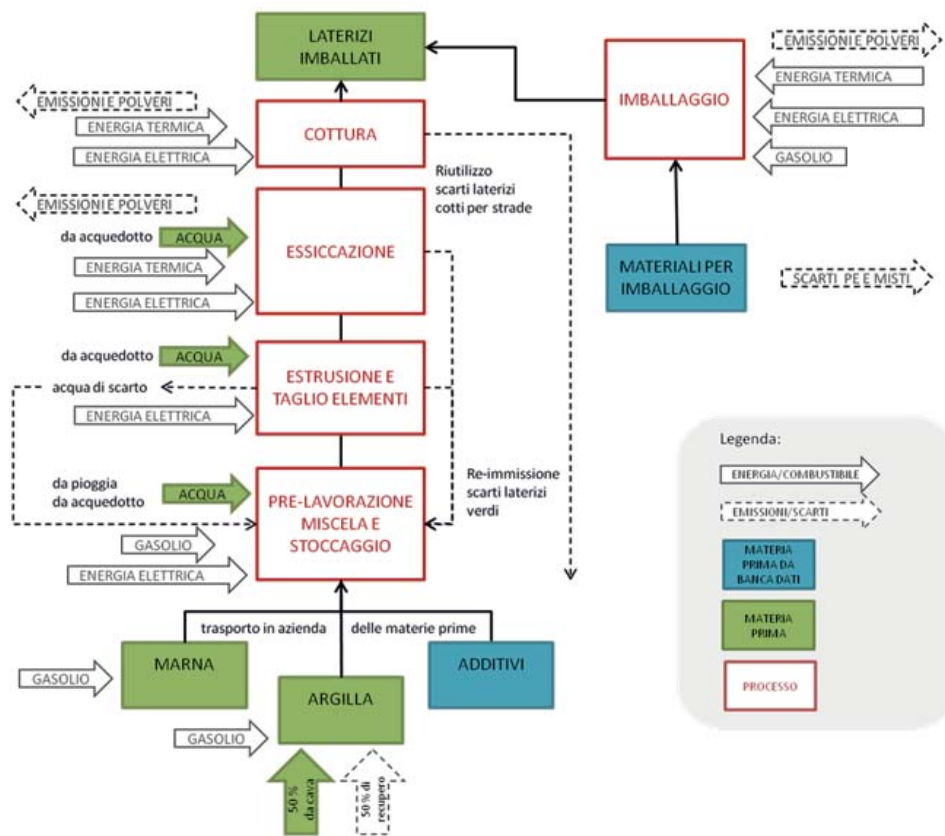


Figura 2.3.7 Processo di produzione e analisi dello scenario senza additivi.

Nella Figura 2.3.6 la fase di produzione utilizza metodi di analisi LCA anche per la selezione delle materie prime: il ricorso a materiali di scarto o a materiali naturali, incide notevolmente sull'impatto del prodotto. Lo studio dei materiali per la produzione industriale è sempre utile se analizzato congiuntamente all'azienda. In alcuni casi può confermare delle scelte, in altri può evidenziare che la strada intrapresa fino a quel momento deve essere modificata, perché ancora troppo impattante. Ad avallo di tali affermazioni si cita il progetto "SI2 - Sistemi Isolanti Innovativi", finanziato dalla Regione Piemonte su Fondi Europei POR-FESR 2007-2013, sviluppato da un partenariato industriale insieme al Politecnico di Torino per formulare nuovi intonaci termici ad elevata prestazione termoresistente e a basso impatto ambientale. Le analisi LCA hanno da subito evidenziato che le materie prime e gli aggregati normalmente utilizzati per i termo-intonaci fossero di gran lunga più impattanti degli aggregati vegetali con simili proprietà fisiche e tecnologiche (vedi grafico in alto a destra di Figura 2.3.8).

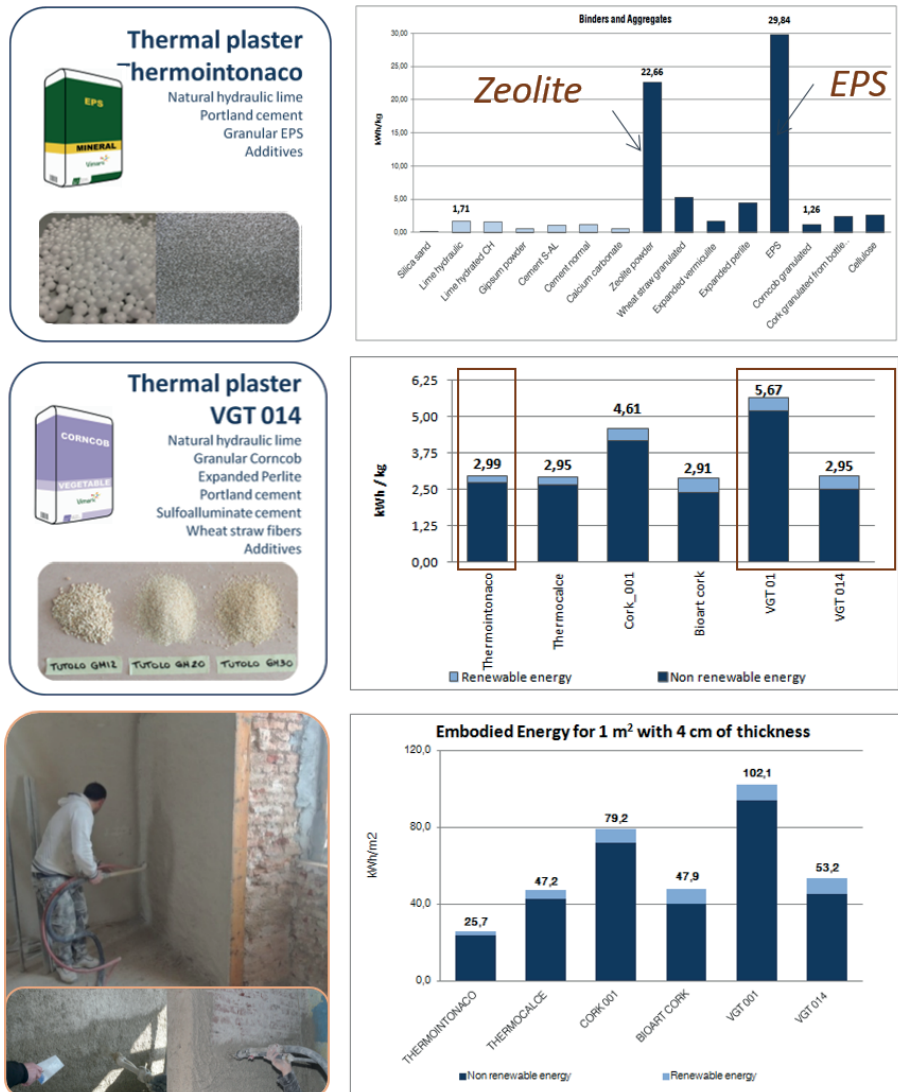


Figura 2.3.8 Analisi del set di materiali per il termo intonaco a), analisi delle miscele b), analisi delle miscele tenendo conto della fase di applicazione.

La scelta di provare a innovare le miscele con aggregati vegetali di scarto abbandonando l'EPS e la zeolite, nasce proprio dalla volontà di ridurre il consumo di risorse energetiche rinnovabili.

Al contrario, la ricerca condotta dal Laboratorio LaSTIn con il Dipartimento DISAT e l'Istituto Crea di Casale Monferrato evidenzia che, per un'azienda produttrice di pannelli di compensato, l'idea di sostituire il legno di pioppo certificato PEFC da quello non certificato non determinerebbe sensibili riduzioni d'impatto ambientale in quanto la maggior parte dell'impatto deriva dall'uso delle colle e dalla spesa energetica per la produzione (con biomassa in parte da scarti di produzione). La strategia aziendale, a seguito della ricerca ha spinto la proprietà a studiare collanti alternativi con bassi contenuti di formaldeide (Figura 2.3.9).



Figura 2.3.9 Produzione di pannello fonoassorbente con scarti da compensato. Fonte F. Caramia, C. Carbonaro, S. Pagliolico.

Andando oltre alla fase di produzione, una delle fasi che poco sono tenute in considerazione, è quella riferita all'attività di costruzione o installazione. Se consideriamo l'ambito dell'edilizia, certamente questa parte del ciclo di vita è più significativa da un punto di vista tecnologico che non da quello ambientale. Normalmente infatti ci si concentra sulle tecniche di ancoraggio e fissaggio, sui tempi di presa o montaggio, elementi il cui carico ambientale è assai meno incidente della fase di produzione. Per alcune tecnologie, invece, questo momento del ciclo di vita può essere importante da analizzare già in fase di progettazione del materiale. Nel succitato progetto SI2, la fase di progettazione integrata, costituita da un processo progettuale iterativo che verificasse contemporaneamente i requisiti ambientali, energetici e tecnologici, si è spinta fino alla fase d'uso. Se nell'analisi LCA degli aggregati è emerso quanto l'uso di EPS fosse svantaggioso rispetto all'uso di tutolo di mais riciclato, il divario in termini d'impatto si riduce passando all'analisi della miscela con i due aggregati differenti: a parità di resistenza termica tra i due termo intonaci quello con EPS usa una quantità di aggregato in peso assai ridotta rispetto al termo intonaco con tutolo di mais riciclato (Figur 2.3.8, grafico centrale). Se si tiene poi conto di una applicazione reale che garantisca la stessa proprietà termoresistente, i valori dell'analisi cambiano ulteriormente: la resa del termo intonaco con EPS è sensibilmente migliore di quella con Tutolo riciclato, la quale necessita il doppio della polvere della miscela (Figura 2.3.8, grafico in basso). L'analisi ambientale delle miscele fino alla fase d'uso ha evidenziato quindi che il termo intonaco con l'aggregato più impattante al "cancello", consuma meno risorse se si analizza una parte più ampia del suo ciclo di vita e non solamente il processo di produzione (Carbonaro et al., 2016), fornendo una risposta ancor più esaustiva all'industria produttrice.

Se l'analisi viene ulteriormente estesa anche al fine vita dei prodotti e degli scarti di produzione, è possibile ridurre costi ambientali sensibili per la società e costi economici rilevanti per l'azienda. Lo sviluppo di strategie per la riduzione e la valorizzazione degli scarti di produzione deve necessariamente mettere in relazione i vantaggi ambientali tramite un'analisi LCA e i costi di intervento: spesso, infatti, la riduzione dei rifiuti da produzione richiede una modifica dei macchinari oppure il lancio di nuove lavorazioni o ancora l'avvio di nuove linee aziendali parallele. Tutte queste operazioni richiedono investimenti costosi da valutare con attenzione. La succitata collaborazione con l'azienda produttrice di compensati (E. Vigolungo plywood) ha evidenziato che nuove linee di prodotti con il reimpiego dei tondelli (avanzi della fase di produzione dei fogli di compensato) e della squadratura (taglio dei lati del pannello post incollaggio), determinerebbero una riduzione dell'uso di risorse da fonte rinnovabile del 3% (Figura 2.3.5). Quindi lo sforzo sarebbe ampio a fronte di una riduzione minima, anche perché i tondelli sono materiale rinnovabile (legno) e la maggior parte dell'impatto dipende dall'uso di colle e di energia per la produzione, non dalle materie prime (che incidono per il 7-11%). Il valore economico per l'impresa sarebbe invece significativo, perché, eviterebbe le spese di smaltimento degli scarti che in un anno ammonterebbero a circa 28.000 Euro. Il valore di un'analisi comparata ambientale e dei costi ha quindi indicato all'azienda su quali lavorazioni intervenire per ridurre gli impatti ambientali e con quale ricaduta economica.

2.3.4 Conclusioni

Il *Life Cycle Design* e la valutazione del ciclo di vita del processo e dei prodotti industriali è oggi necessaria per poter contenere e se possibile scongiurare il cambiamento climatico. Per il settore industriale l'analisi ambientale è ancora troppo spesso legata all'utilità in termini di certificazione ambientale, necessaria per accedere a nuovi mercati o a rispondere a requisiti normativi cogenti. Ci sono ormai però numerosi casi di applicazioni industriali dello studio LCA in cui il progetto integrato che tiene conto dell'intero ciclo di vita, non solo porta benefici all'ambiente, ma anche all'azienda che riesce così a quantificare scientificamente i costi energetici, materici e ambientali del processo manifatturiero. Risparmiare materia prima ed energia, significa risparmiare risorse economiche in alcuni casi anche di notevole entità. L'analisi comparativa tra scenari del processo di produzione è quindi uno strumento importante per valutare strategie d'azienda alternativa, che oltre implementare il grado di sostenibilità dei prodotti, ne riduce anche i costi. I programmi incentivanti dell'incremento della competitività industriale, come il programma industria 4.0, sono certamente da sfruttare in ottica *Life Cycle*: sistemi IOT per il controllo di ogni sistema di produzione, l'inserimento di tecnologie ad elevata efficienza, i servizi per incrementare la produttività, sono tutte azioni da intraprendere contestualmente ad una analisi scientifica della produzione, delle materie prime e della vita del prodotto, in modo da verificarne l'efficacia.

Alla luce delle esperienze condotte, certamente è fondamentale non fermarsi ad una analisi "dalla culla al cancello" dell'azienda: le fasi d'uso e manutenzione incidono fortemente sulle reali performance del prodotto, lo studio delle quali, può garantire una sua maggiore appetibilità sul mercato rispetto ai diretti concorrenti.

In una svolta sistemica come quella dell'economia circolare, il progetto è quindi sempre più centrale, e sempre più integrato tra gli attori della filiera sociale: industria, fornitori, consulenti, enti di ricerca e sviluppo, istituzioni pubbliche e consumatori. Un progetto così omnicomprensivo deve quindi adottare strumenti scientifici come il LCA.

Bibliografia

- Caramia F., 2019. "Approccio circolare per l'industria del compensato: innovazione tecnologica con gli scarti di produzione", Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Architettura Per Il Progetto Sostenibile.
- Carbonaro C., Tedesco S., Thiebat F., Fantucci S., Serra V., Dutto M., 2015. "Development of vegetal based thermal plasters with low environmental impact: optimization process through an integrated approach", *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 967-972.
- Carbonaro C., Tedesco S., Thiebat F., Fantucci S., Serra V., Dutto M., 2016. "An integrated design approach to the development of a vegetal-based thermal plaster for the energy retrofit of buildings", *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 46-59.
- Carbonaro C., Thiebat F., 2017. "Analisi del ciclo di vita del laterizio: un caso studio in Piemonte", *XI Convegno della Rete Italiana LCA - Resource Efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking*, Siena, 22-23 giu.
- Chiarabaglio P.M., Deidda A., Bergante S., Castro G., Facciotto G., Giorcelli A., Pagliolico S.L., Carbonaro C., 2019. "Life Cycle Assessment (LCA): new poplar clones allow an environmentally sustainable cultivation", *IV Congresso Nazionale di Selvicoltura. Il bosco: bene indispensabile per un presente vivibile e un futuro possibile*, Torino, 5-9 nov.
- Di Maria E., De Marchi V., Blasi S., Mancini M., Zampetti G., 2018. *L'economia circolare nelle imprese italiane e il contributo di Industria 4.0*, Legambiente e Università di Padova.
- European Union, 2016. *Buying Green – A handbook on green public procurement, third edition*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- EU Commission, 2011. *Rio+20: verso un'economia verde e una migliore governance*. COM (2011). 363.
- EU Commission, 2015. *L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare*. COM(2015). 614.
- Goldsmith E., Allen R., Allaby M., Davoll J., Lawrence S., 1972. "A Blueprint for Survival", *the Ecologist*, vol. 2(1), Penguin , Ecosystems Ltd.
- GreenItaly, 2019. *Una risposta alla crisi, una sfida per il futuro*, I quaderni di Symbola, Fondazione Symbola – Unioncamere, GreenItaly.
- Guinée J.B., Heijungs R., Huppes G., Zamagnim A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T., 2011. "Life cycle assessment: past, present, and future", *Environmental Science & Technology*, vol. 45, pp. 90-96.
- ISO 14025:2006. *Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures*.
- ISO 14021:2016. *Environmental labels and declarations - Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)*.
- ISO 14024:2018. *Environmental labels and declarations - Type I environmental labelling - Principles and procedures*.
- McManus M., Taylor C.M., 2015. "The changing nature of life cycle assessment", *Biomass and Energy*, vol. 82, pp. 13-26.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. III, 1972. *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.
- Saunders H.D., 1992. "The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth", *Energy Journal*, vol. 13, pp. 131-148.
- World Meteorological Organization (WMO), 2019. *The global climate in the 2015-2019*.



2.4 Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita

Il passaggio a un'economia circolare rappresenta una delle azioni chiave dell'Unione Europea, che considera prioritario investire in un modello alternativo a quello attuale, di tipo lineare, legato a "produzione-consumo-smaltimento". La transizione verso un'economia circolare sposta l'attenzione sul riutilizzare, rinnovare, riciclare i materiali e i prodotti esistenti in una logica di rifiuto come risorsa (European Commission, 2015).

Sostenuta dalle politiche internazionali, l'economia circolare può essere un motore di innovazione e un'opportunità per molti settori, compreso quello dell'edilizia. I dati riportati nel documento *Verso un modello di economia circolare per l'Italia* del Ministero dell'Ambiente italiano evidenziano infatti l'importanza strategica dell'industria delle costruzioni nello sviluppo di un'economia in cui l'uso sostenibile delle risorse e l'utilizzo dei rifiuti diventano le chiavi per un nuovo modello di sviluppo (Ministero dell'Ambiente italiano, 2017). In questa direzione, l'Italia ha introdotto i Criteri Ambientali Minimi (CAM), strumenti di politica pubblica in grado di promuovere l'impiego di prodotti con contenuto riciclato e di materiali a basso impatto ambientale nel ciclo di vita (Decreto 259/2017 del Ministero dell'Ambiente). Il sostegno legislativo e l'incentivo allo sviluppo e all'uso di prodotti ottenuti dal riciclaggio di materie prime seconde stanno portando alla diffusione di progetti e "buone pratiche" di cooperazione tra imprese, organizzazioni di ricerca e start-up specializzate nel riutilizzo e nel riciclaggio di rifiuti e materie prime secondarie (Pauli, 2015; Zamboni, 2011).

Rifiuti e scarti, anche di settori apparentemente lontani da quello dell'edilizia, possono infatti rappresentare un'opportunità strategica per lo sviluppo non solo di nuovi prodotti, ma anche di nuove filiere "circolari" e di processi di simbiosi industriale.

In questo contesto, l'approccio al ciclo di vita rappresenta uno dei principali strumenti per la valutazione di prodotti e la pianificazione di processi, utile per lo sviluppo di soluzioni e strategie di economia circolare.

Sulla base di queste premesse, il capitolo è finalizzato a illustrare le potenzialità dell'approccio al ciclo di vita per lo sviluppo di nuovi prodotti per l'edilizia a partire da scarti di altre lavorazioni, in particolare derivanti dalla valorizzazione di scarti del settore agroalimentare e tessile, che hanno portato alla definizione di nuovi scenari industriali di tipo intersettoriale. Attraverso la descrizione di alcuni progetti condotti dal Gruppo TeAM del Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, in collaborazione con piccole e medie imprese, il contributo evidenzia l'approccio metodologico adottato, in una logica dalla "tomba alla culla", in cui i rifiuti di un processo diventano nuova risorsa per un altro.

2.4.1 Come sviluppare prodotti e processi circolari

L'approccio metodologico generalmente utilizzato dal gruppo di ricerca per lo sviluppo di nuovi prodotti e di scenari circolari è caratterizzato da logiche legate all'*upcycling* e si basa

Silvia Tedesco

Ricercatore RTDB di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design.
E-mail: silvia.tedesco@polito.it

Elena Montacchini

Professore Associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design.
E-mail: elena.montacchini@polito.it

sulle seguenti macro-fasi:

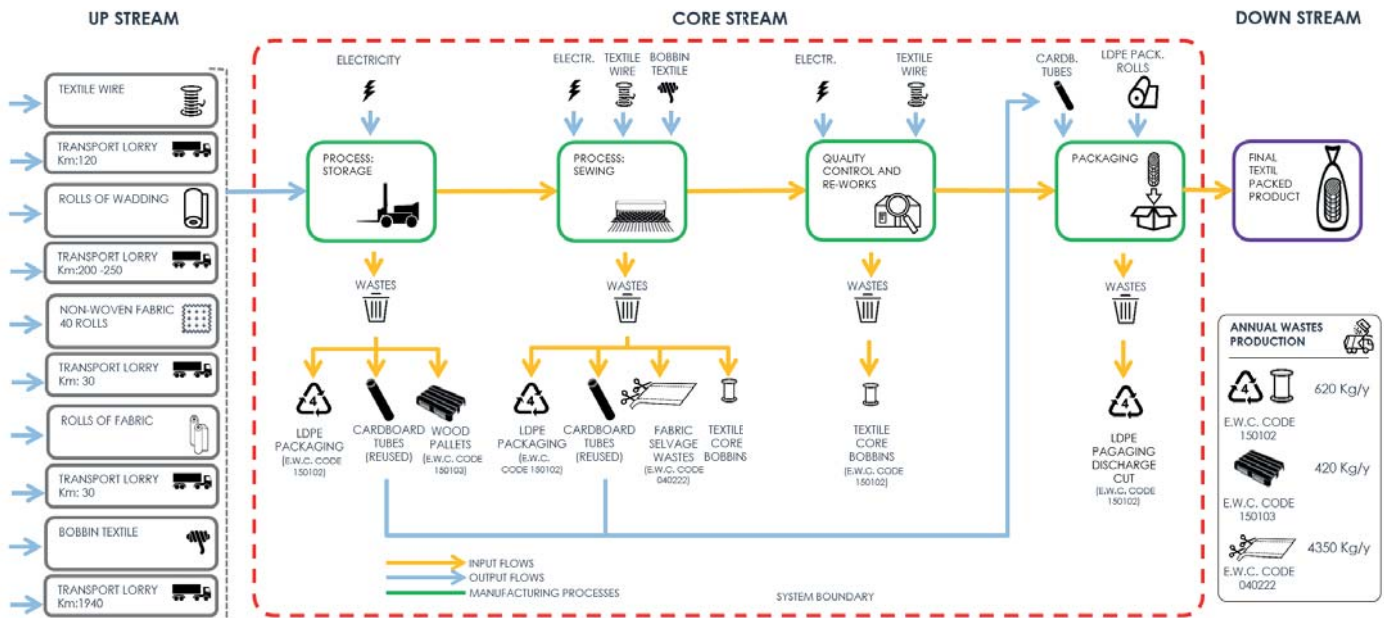
- sviluppo di audit ambientali presso le aziende, per identificare tipologia e quantitativi di rifiuti di produzione;
- studio di dati derivanti da letteratura scientifica internazionale e database, finalizzati a identificare potenziali applicazioni di riciclaggio per la realizzazione di prodotti per l'edilizia;
- mix design, sperimentazione e prototipazione;
- verifica dei risultati dal punto di vista delle prestazioni tecnologiche e ambientali;
- identificazione degli attori e degli stakeholder della filiera (pubblici e privati) e ipotesi di nuovi modelli di economia circolare.

Audit ambientali

La fase di audit ambientale presso le aziende consente lo studio e la conoscenza del sistema di produzione, l'identificazione dei processi a maggior impatto e la valutazione delle azioni di miglioramento che possono essere messe in atto.

Per una prima acquisizione di dati, il gruppo TeAM ha sviluppato un questionario, come strumento di approccio e conoscenza delle aziende coinvolte nei progetti, con l'obiettivo di caratterizzare il tipo di produzione, gli scarti prodotti e il loro riuso o smaltimento. Il questionario è suddiviso in tre macro argomenti, una prima parte dedicata principalmente ai dati aziendali, seguita da una seconda sezione dedicata alla tipologia di produzione industriale e ai volumi di produzione. La parte finale si focalizza sulla produzione degli scarti definendo la tipologia, i quantitativi, la frequenza di produzione e il costo di smaltimento. Lo studio del processo di produzione e gestione dei rifiuti, la definizione del sistema input-output del sistema di produzione e la delimitazione del corrispondente diagramma di flusso viene effettuato attraverso sopralluoghi e interviste all'interno dell'azienda, come esemplificato in Figura 2.4.1 (Carbonaro et al., 2018).

Figura 2.4.1 Esempio di *flow chart* di analisi del processo produttivo di un'azienda tessile. Fonte: immagine di C. Carbonaro.



Studio di dati derivanti da letteratura scientifica e database

Per valutare le potenzialità di riuso e di riciclo dei materiali di scarto e identificare potenziali applicazioni per la realizzazione di prodotti per l'edilizia, parallelamente alla fase di audit, vengono condotte analisi sullo stato dell'arte utilizzando le principali piattaforme della ricerca scientifica internazionale, quali Scopus, ResearchGate e Science-Direct. Definito un ambito temporale di ricerca, selezionate le principali *keywords*, la documentazione scientifica estratta viene catalogata su un database, suddivisa per tematiche, per tipologia di articolo (review, sperimentale o argomentativo); una successiva schedatura viene effettuata per gli articoli che documentano informazioni ritenute rilevanti per le successive fasi di sperimentazione (Figura 2.4.2).

Un'ulteriore ricerca viene effettuata sulle materiotecche virtuali dedicate ai materiali sostenibili, riciclati e riciclabili, come MATERIAL RECYCLING, Material Connexion e MATto, e un'analisi di anteriorità su brevetti e modelli di utilità, attraverso Orbit. Questo insieme di dati costituisce la premessa per le fasi di mix design, sperimentazione e prototipazione, in quanto consente di comprendere le tecniche, i processi e le potenzialità di eventuali esperienze già condotte.

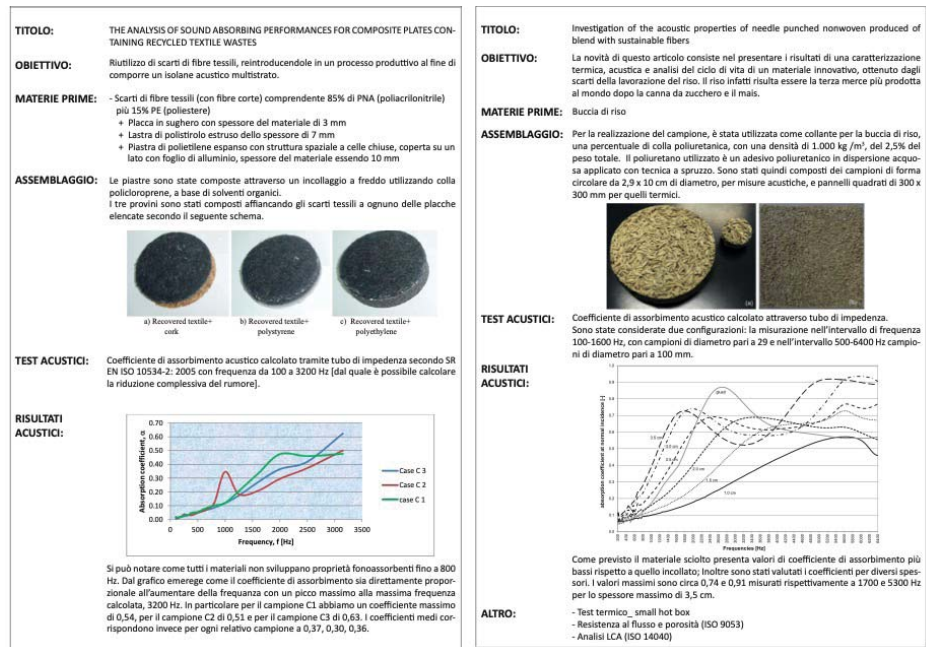


Figura 2.4.2 Esempio di sistema di schedatura di articoli da letteratura scientifica internazionale. Fonte: immagine di G. Targa.

Mix design, sperimentazione, prototipazione

L'attività di mix design e sperimentazione prevede una prima fase di selezione dei materiali, di caratterizzazione, dal punto di vista fisico e chimico, e di verifiche preliminari di lavorabilità, funzionali alla realizzazione di provini.

Sulla base dei risultati ottenuti vengono poi realizzati prototipi su cui testare le performance e valutare l'eco-compatibilità dei processi produttivi.

Il gruppo di ricerca si avvale del supporto dei Laboratori del Politecnico di Torino e in particolare delle attività del Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LaSTIn). Il Laboratorio è dotato di attrezzature per realizzare test e prove su materiali, componenti e sistemi,

connesse sia a progetti di ricerca avanzati, sia ad attività di certificazione prestazionale in ambito energetico e ambientale (Figura 2.4.3).

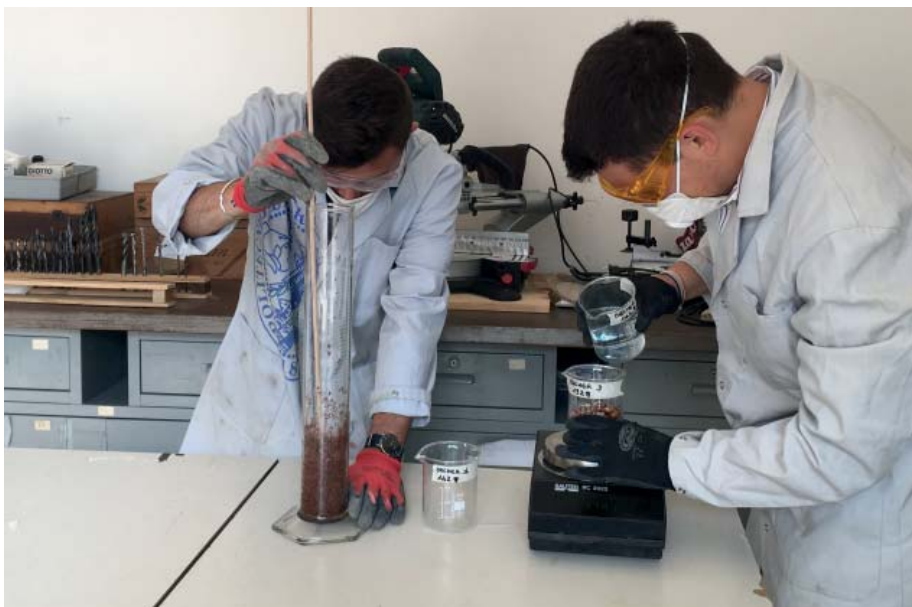


Figura 2.4.3 Attività di sperimentazione al laboratorio LaSTIn.

Valutazioni tecnologiche e ambientali

Sui provini e/o sui prototipi realizzati vengono verificati i requisiti di resistenza meccanica e valutate le prestazioni termiche e acustiche come previsto dalle normative tecniche in materia, in base all'obiettivo specifico del progetto (Figura 2.4.4). Per valutare gli impatti ambientali vengono effettuati studi *Life Cycle Assessment* (LCA), attraverso specifici software (Sima Pro, eTOOL, Open LCA, Cambridge Engineering Selector) e database (Ecolinvent, ELCD).



Figura 2.4.4 Attrezzature e strumenti di prova.

Scenari di filiera

L'ultima fase prevede la progettazione di un modello di filiera circolare *ad hoc* per le aziende coinvolte. In generale vengono identificate le figure della rete (*stakeholders* o portatori di interesse) e le fasi del nuovo processo. Nello specifico vengono individuate le attrezzature necessarie a svolgere le operazioni di raccolta ed eventuale imballaggio dei rifiuti, i luoghi adibiti allo stoccaggio del materiale, i processi industriali per la trasformazione della materia e un'ipotesi di costi e i ricavi per la realizzazione del complesso circolare (Figura 2.4.5).

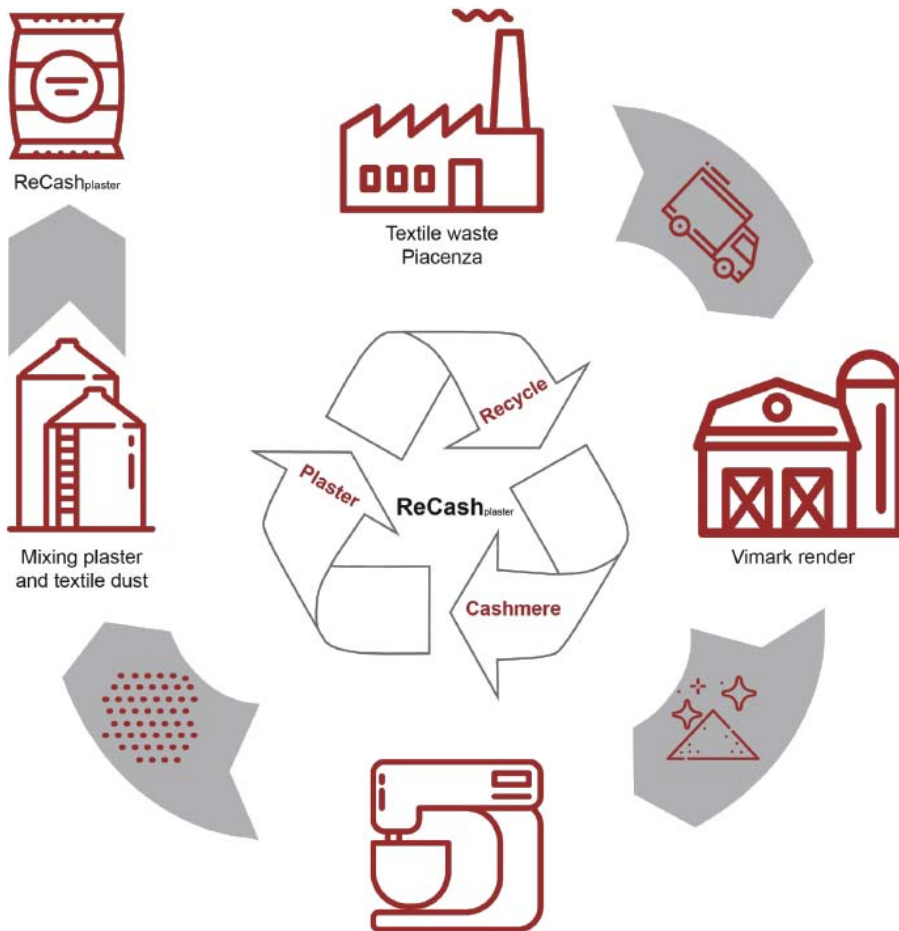


Figura 2.4.5 Ipotesi di scenario di economia circolare. Lo scenario si riferisce alla ricerca ReCache Plaster descritta nel paragrafo successivo. Fonte: immagine di S. Fiorina.

2.4.2 Esperienze di ricerca e sperimentazione

Questo paragrafo illustra alcune esperienze condotte dal Gruppo TeAM del Dipartimento di Architettura e Design – Politecnico di Torino, finalizzate allo sviluppo di eco-prodotti edilizi basati su rifiuti riutilizzati e riciclati, derivanti da processi di lavorazioni industriali e caratterizzati, nella maggior parte dei casi, da studi *Life Cycle Assessment* (LCA).

In particolare si descrivono i seguenti progetti: 1) ECOFFI, incentrato sul riciclaggio delle pannocchie di mais e della paglia di riso per la produzione di blocchi di cemento; 2) ReCache Plaster, finalizzato alla valorizzazione di scarti tessili pre-consumo all'interno di malte per intonaci; 3) GRE_EN_S, il cui obiettivo è lo sviluppo di un innovativo sistema di parete vegetata modulare, a basso impatto ambientale.

ECOFFI

L'obiettivo della ricerca "Ecological CONcrete Filled Fibers" (ECOFFI) è sviluppare un nuovo prodotto in calcestruzzo, attraverso il riciclaggio dei sottoprodotti agricoli, tramite la progettazione di una filiera a km 0. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito di un programma

di cooperazione interregionale tra Politecnico di Torino e Piccole e Medie Imprese italiane e francesi (Sarotto Group sas, Narzole, CN e Vicat Group, L'Isle D'Abeau).

A seguito di una mappatura e quantificazione dei residui agricoli disponibili in un contesto locale, con rilevamento per ciascun sottoprodotto delle diverse caratteristiche (tipologia di materiale, dimensioni, quantità, frequenza di produzione, prezzo, ecc.), di un'analisi dell'attuale scenario di utilizzo degli scarti nel settore dell'edilizia, è stato possibile selezionare i sottoprodotti della filiera del mais e del riso, in particolare il tutolo di mais e la paglia di riso. Sono state poi condotte una serie di sperimentazioni attraverso la realizzazione di provini ottenuti dalla miscela di: cemento naturale, acqua, acido citrico (ritardante di presa), paglia di riso e tutolo di mais (Giordano et al., 2019).



Figura 2.4.6 Componenti del mix design e prototipo del nuovo blocco.

All'interno dei laboratori del Politecnico di Torino sono stati verificati i requisiti di lavorabilità, resistenza meccanica e resistenza termica, come previsto dalla normativa tecnica.

La metodologia *Life Cycle Assessment* riferita alla fase *cradle to gate*, ovvero dall'estrazione delle materie prime al cancello di uscita dell'azienda produttrice del prototipo (Sarotto Group sas), è stata utile per confrontare i processi produttivi in termini di consumi energetici ed impatti (EE *Embodied Energy*+ EC *Embodied Carbon*) rispetto a quelli di blocchi in calcestruzzo leggero disponibili sul mercato.

La tabella che segue (Tabella 2.4.1) riporta i dati di EE e EC del blocco ECOFFI fino al cancello di entrata dell'azienda Sarotto Group sas.

| Materiale | F.U. (kg) | EE (MJ/kg) | EC (kgCO ₂ /kg) |
|---------------------------------|-----------|------------|----------------------------|
| Cemento Prompt, acqua, additivi | 0,76 | 2,27 | 0,28 |
| Tutolo di mais | 0,19 | 0,33 | -0,58 |
| Paglia di riso | 0,05 | 0,074 | -0,02 |

Tabella 2.4.1 EE e EC del blocco ECOFFI fino al cancello di entrata dell'azienda Sarotto Group sas. I dati del cemento Prompt non possono essere pubblicati separatamente, vengono quindi forniti in forma aggregata.

Includendo nella valutazione il processo produttivo è stato calcolato un valore di EE pari a 3,03 MJ/kg e di EC pari a -0,16 kgCO₂/kg: il valore di EE è allineato a quello medio di calcestruzzi leggeri in blocchi, compreso fra 2,53 e 3,5 MJ/kg (Andreotti et al., 2019); il valore di EC evidenzia il credito ambientale legato ai componenti vegetali.

La ricerca è tutt'ora in corso e sono in fase di implementazione i test sul prodotto (come ad esempio la resistenza al fuoco) e lo studio della filiera produttiva.

ReCache Plaster

ReCash Plaster (Recycled Cashmere for Plaster) è uno studio di prefattibilità finalizzato alla valorizzazione di scarti tessili pre-consumo all'interno di malte per intonaci. Lo studio è stato condotto assumendo come riferimento il distretto tessile del biellese e ha visto il coinvolgimento di un'azienda leader nella produzione di intonaci (Vimark srl, Peveragno, CN). In particolare sono state mappate venti delle aziende tessili del distretto, sono stati indagati i processi produttivi e sviluppati *flow chart* per evidenziare le quantità di scarti generati nelle diverse fasi e la loro tipologia.

L'analisi aziendale ha consentito di identificare tre tipologie di scarto prevalente: le polveri e microfibre, le cimose e i sottocarda (Figura 2.4.7). L'interesse è ricaduto sulle polveri e microfibre, scarti che da un lato costituiscono un costo di smaltimento per le aziende, non avendo la possibilità di essere riprocessati (cioè di essere reimessi nel ciclo produttivo e tornare ad essere filato), dall'altro risultano i più idonei alle finalità della sperimentazione. La letteratura scientifica infatti riporta alcune interessanti sperimentazioni sull'impiego di scarti tessili sotto forma di polveri e microfibre per il miglioramento delle prestazioni fisiche delle malte e di le fibre di lana per il rinforzo di cementi.

Tra gli scarti selezionati, il più interessante dal punto di vista di quantità, composizione e dimensione è stato quello delle polveri di lavorazione del Lanificio Fratelli Piacenza di Pollone (BI) in lana e cashmere. Tali scarti si presentano sotto forma di microfibre pressate in balle rettangolari o cilindri e sono attualmente destinati a discarica.

In fase sperimentale, a partire da un intonaco fibrato premiscelato (a base di cemento e calce aerea) prodotto dall'azienda Vimark sono state sostituite le fibre di vetro contenute nella miscela con diverse concentrazioni di scarto tessile.

Su differenti mix design sono state effettuate le prove di laboratorio (secondo la UNI EN 998-1 e UNI EN 1015) necessarie per verificare il contributo della fibra tessile: prove sulla malta fresca, come la consistenza o la percentuale di acqua nell'impasto, e prove a 28 giorni, come l'aderenza al supporto, la resistenza a flessione e a compressione.



Figura 2.4.7 Tipologie di scarti tessili: polveri e microfibre (a sinistra), cimose (al centro) e sottocarda (a destra).

Confrontando i risultati finali con gli intonaci fibrati attualmente prodotti nello stabilimento, i test eseguiti con 5 g/kg di scarto tessile hanno evidenziato un significativo miglioramento delle prestazioni: l'adesione al supporto raddoppia e le resistenze meccaniche sia a flessione sia a compressione sono notevolmente maggiori. È in corso uno studio LCA di tipo comparativo per valutare le performance ambientali della nuova miscela. Da analisi microscopiche del campione, effettuate dal Consiglio Nazionale delle Ricerche di Biella (CNR-ISMAL), le fibre tessili non tendono a degradarsi nel tempo, garantendo il mantenimento delle prestazioni.

Figura 2.4.8 I campioni di intonaco realizzati con microfibre di lana e cachemere.



Sulla base dei risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione (Figura 2.4.8) sono stati ipotizzati due possibili scenari di filiera per mettere in rete l'azienda che produce lo scarto e l'azienda che lo riceve. Tali scenari ruotano attorno al problema dello stoccaggio, lavorazione e trasporto degli scarti. Il primo scenario (Figura 2.4.5) vede come protagonista l'azienda produttrice di intonaci che dovrebbe investire in un macchinario per la dispersione industrializzata delle fibre nella miscela, eseguita manualmente in fase sperimentale. Il secondo scenario prevede l'aggiunta di un tassello alla filiera, tra l'azienda fornitrice dello scarto e l'azienda di produzione degli intonaci: una terza azienda in grado di occuparsi del prelievo degli scarti e del loro trattamento per la successiva valorizzazione economica come nuova risorsa. Ognuno di questi scenari presenta punti di forza e di debolezza che meritano di essere discussi in fase di sviluppo industriale, ma è formulato per prevedere dei vantaggi economici per le parti coinvolte. In una logica di *upcycling*, alcuni scarti tessili pre-consumo possono dunque trasformarsi da rifiuto a risorsa ed essere inseriti in una nuova "catena del valore" (Montacchini et al., 2019).

GRE_EN_S

GRE_EN_S, acronimo di "GREen ENvelope System", costituisce un esempio fattivo di *closed loop* nella realizzazione di pareti vegetate. GRE_EN_S è un progetto di ricerca tra università e aziende, finanziato sui fondi POR_FESR della Regione Piemonte, che ha avuto come obiettivo lo sviluppo e la sperimentazione di un innovativo sistema di parete vegetata modulare, a basso impatto ambientale, risultato di un approccio sistemico alla progettazione e produzione, legato all'intero ciclo di vita. GRE_EN_S infatti è un sistema vegetato che utilizza elementi di scarto da lavorazioni industriali (Figura 2.4.9), riduce la quantità complessiva di materiali e semilavorati della stratigrafia, ottimizza le fasi di assemblaggio, garantisce elevate prestazioni in fase di esercizio, riduce le operazioni di manutenzione e limita gli impatti a fine vita.

Per lo sviluppo della ricerca sono stati assunti come riferimento i dati di letteratura e i prodotti già disponibili sul mercato (Giordano et al., 2013).

La progettazione della stratigrafia del sistema GRE_EN_S (Figura 2.4.10) è stata effettuata nell'ottica di individuare materie prime seconde a basso impatto ambientale e a costo contenuto, in grado di sostituirsi alle materie prime generalmente utilizzate nella



Figura 2.4.9 Substrato realizzato con scarti di feltrini sottosedie sminuzzati.

realizzazione di una parete vegetata. In particolare è stata condotta un'attività di valutazione e di caratterizzazione ambientale delle materie prime e delle materie prime seconde che costituiscono lo strato di accrescimento delle piante (substrato realizzato con una miscela a base di scarti di produzione di feltrini sottosedie sminuzzati, utilizzati in sostituzione dei polimeri idroretentori normalmente impiegati in queste soluzioni), lo strato di rivestimento (realizzato con un feltro in polipropilene riciclato), l'elemento strutturale (in alluminio riciclato).

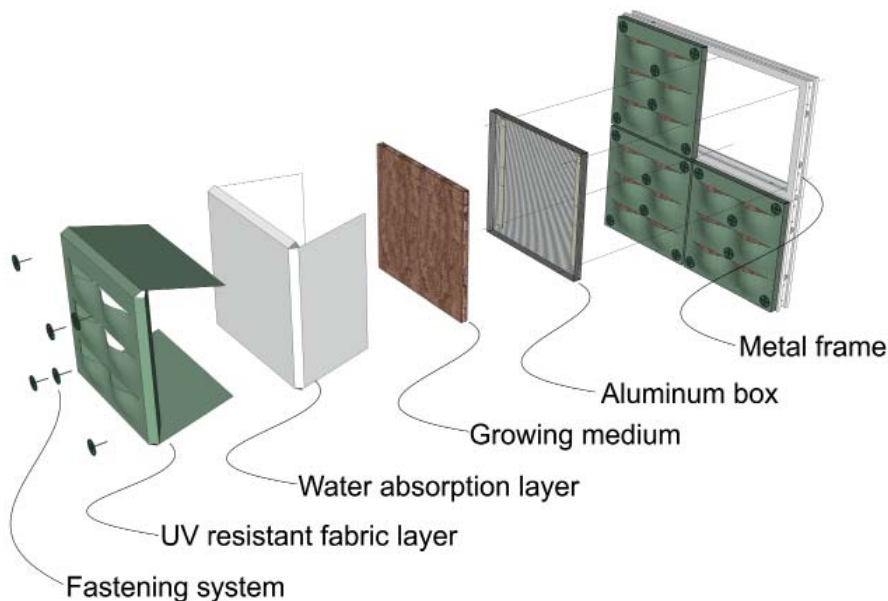


Figura 2.4.10 Stratigrafia del modulo vegetato.

Attraverso uno studio LCA sono stati confrontati due scenari (Figura 2.4.11): il primo, relativo all'ipotesi di realizzazione del pannello vegetato esclusivamente con materie prime vergini, il secondo con contenuto di riciclato (Giordano et al., 2014). Se si considera l'impatto ambientale legato al surriscaldamento globale (GWP, *Global Warming Potential*), dovuto alle emissioni inquinanti in atmosfera, il secondo scenario, con un GWP pari a 20.45 kg CO₂eq/m², risulta avere un impatto più che dimezzato rispetto al primo, con un GWP di 55.98 kg CO₂eq/m² (Serra et al., 2017).

Il sistema parete è stato inoltre progettato per essere disassemblabile a fine vita, grazie a connessioni meccaniche reversibili e alla separabilità e riciclabilità della maggior parte degli elementi che compongono la sua stratigrafia.

| LWS Layer | Material | F.U. [kg/m ²] | Initial EE _{NR} [Mj/m ²] | E.S.L. | EE _{NR} [Mj/m ²] |
|-----------------------------------|--------------|------------------------------|--|--------|--|
| Vegetation | Honeysuckle | - | 5,00 | 10 | 25,00 |
| External cladding | PP fibre | 5,88 | 476,34 | 10 | 2381,69 |
| Filter and water retention fabric | VI fabric | 0,392 | 34,28 | 10 | 171,42 |
| Dry growing medium | Potting soil | 1,68 | 28,51 | 10 | 142,55 |
| Roots holder layer | PP geomat | 1,3 | 105,31 | 20 | 263,28 |
| LWS Framework | Al alloy | 5 | 1017,15 | 50 | 1017,15 |
| | | 14,25 | 1666,59 | | 4001,09 |

GRE_EN_S Reference scenario (E.S.L. = Expected Service Life).

| LWS Layer | Material | F.U. [kg/m ²] | Initial EE _{NR} [Mj/m ²] | E.S.L. | EE _{NR} [Mj/m ²] |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|--|--------|--|
| Vegetation | Honeysuckle | - | 5,00 | 10 | 25,00 |
| External cladding | 30% REC PP fiber | 5,88 | 338,81 | 10 | 1694,03 |
| Filter and water retention fabric | VI fabric | 0,392 | 34,28 | 10 | 171,42 |
| Dry growing medium | Potting soil - REC felts | 1,68 | 14,38 | 10 | 71,90 |
| Roots holder layer | 30% REC PP geomat | 1,3 | 74,91 | 20 | 187,27 |
| LWS Framework | 30% REC Al alloy | 5 | 459,70 | 50 | 459,70 |
| | | 14,25 | 927,08 | | 2609,32 |

GRE_EN_S Recycling scenario (E.S.L. = Expected Service Life).

Figura 2.4.11 Scenario di riferimento (pannello GRE_EN_S con materie prime vergini) e scenario con materiali riciclati (F.U.: unità funzionale, EE_{NR}: Embodied Energy da fonti non rinnovabili, GWP: Global Warming Potential). Fonte: Giordano et al., 2014.

Oltre alla valutazione di aspetti legati alla selezione dei materiali, al sistema di produzione e assemblaggio e alle modalità di dismissione e riciclo, il progetto ha posto particolare attenzione anche alla valutazione delle prestazioni in fase di esercizio. I prototipi realizzati sono stati testati sia in laboratorio sia in situ (Figura 2.4.12) per verificare prestazioni tecnologiche, agronomiche, termiche, acustiche in esercizio. I risultati dei monitoraggi hanno dimostrato un significativo miglioramento di tutte le prestazioni rispetto alla media delle soluzioni in commercio (Serra et al., 2017).

Sulla base dei risultati raggiunti e di successive attività di implementazione e ottimizzazione dei prototipi, che hanno portato allo sviluppo di un brevetto per invenzione industriale, il



Figura 2.4.12 Edificio campione realizzato a Environment Park (TO) per i monitoraggi in situ.

progetto di ricerca è diventato una vera e propria attività di impresa, una start up operante nel settore della ricerca, della produzione e della commercializzazione di prodotti e servizi innovativi ad alto valore tecnologico, con particolare riferimento alle pareti vegetate. La start up, che ha ottenuto il riconoscimento di Spin Off del Politecnico di Torino, è la dimostrazione della possibilità di mettere in atto un nuovo modo di fare innovazione secondo logiche circolari (Larcher et al., 2018).

2.4.3 Conclusioni

Il contributo dimostra come, utilizzando l'approccio *Life Cycle* come strumento di progetto, possano essere "disegnati" non solo nuovi prodotti ma anche nuovi processi di economia circolare. Al di là dei risultati specifici ottenuti nelle singole ricerche o del loro livello di maturità e approfondimento, la metodologia adottata è stata utilizzata in modo trasversale, in diversi momenti del processo progettuale (dall'ideazione delle soluzioni alla verifica delle performance ambientali), con il fine ultimo di individuare modalità per ridare valore a prodotti di scarto secondo logiche di *upcycling* e di immaginare nuove prospettive di simbiosi industriale basate sui principi dell'economia circolare.

Le attività di ricerca e sperimentazione, condotte in collaborazione con Piccole e Medie Imprese, documentano inoltre il crescente interesse su questi temi non solo da parte del mondo accademico ma anche di quello produttivo. Nel complesso i risultati evidenziano che nuovi processi virtuosi sono attuabili secondo un approccio sistemico che unisce settori solo apparentemente lontani tra loro, come quello delle produzioni agroalimentare e tessile e quello dell'edilizia.

Contributo degli autori

L'articolo è stato scritto in parti uguali dagli autori.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare tutti i soggetti che, a vario titolo, hanno partecipato alle ricerche e fornito il proprio supporto in fase di sviluppo e sperimentazione.

Per ECOFFI: Jacopo Andreotti e Denis Faruku, Roberto Giordano (DAD, Politecnico di Torino) Corrado Carbonaro (Laboratorio LaSTIn, Politecnico di Torino), Marco Cappellari (Vicat), Mauro Sarotto (Sarotto Group). Un ringraziamento particolare all'arch. Stefano Fantucci e alla prof.ssa Valentina Serra (DENERG, Politecnico di Torino) per la collaborazione alla verifica delle prestazioni termiche.

Per ReCash Plaster: Simone Fiorina, Marco Dutto e Cinzia Ferrua (Vimark srl), Lanificio Fratelli Piacenza, Tecnomeccanica Biellese e CNR Biella.

Per GRE_EN_S: Valentina Serra e il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, Federica Larcher e il Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Torino (AGRO.SEL.VITER) nonché tutti i partner industriali (CEIT, REVIPLANT, 13 RICREA, SAFI-TECH). Un ringraziamento all'arch. Gabriele Druetta per il supporto in tutte le fasi della ricerca e a Environment Park per la disponibilità ad ospitare nel proprio sito l'edificio campione. Infine uno speciale ringraziamento all'ing. Giulia Tancredi e all'ing. Enrico Ghia (Incubatore Imprese Innovative I3P, Politecnico di Torino) per il supporto nelle attività di trasferimento tecnologico.

Bibliografia

- Andreotti J., Faruku D., Giordano R., 2019. "“Coltivare” la filiera del riciclo di sottoprodotti agricoli nella produzione del calcestruzzo", *International Conference 5R - Refuse, Reduce, Repair, Reuse, Recycle. “Recycling of wastes and drosses in buildings: from downcycling to upcycling towards the objectives of circular economy”*, Roma, 24 maggio.
- Carbonaro C., Giordano R., Montacchini E., Muñoz Veloza A.M., Tedesco S., 2018. "EDILTEX: new building materials from textile wastes. An experience of industrial symbiosis practices", *International Sustainable Development Research Society Conference*, Messina, 13-15 giugno, pp. 739-744
- Decreto 259/2017 del Ministero dell'Ambiente, 2017. *Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*.
- European Commission, 2015. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2019. "All you can't eat: research and experiences from agri-food waste to new building products in a circular economy perspective", in Cecchin A., Cutaia L., Deutz P., Raggi A., Salomone R. (eds), *Industrial symbiosis for the circular economy: operational experiences, best practices and obstacles to a collaborative business approach*, Springer.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2013. "Life Cycle Approach to design, manufacturing and assessing a Living Wall System/L'approccio al ciclo di vita nella progettazione, produzione e monitoraggio di una facciata verde", *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 5, pp. 184-190.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2014. "Eco-innovation based on Life Cycle Assessment and Green-Design. Strategies in manufacturing a Living Wall System", *World Sustainable Building WSB14*, Barcelona, 28-30 ottobre.
- Larcher F., Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2018. "A spin-off as an effective result of transfer of knowledge and skills in the field of living wall systems", *Acta Horticulturae*, vol. 1215, pp. 341-344.
- Ministero dell'Ambiente, 2017. *Verso un modello di economia circolare per l'Italia*. Documento di inquadramento e di posizionamento strategico. http://consultazione-economiacircolare.minambiente.it/sites/default/files/verso-un-nuovo-modello-di-economia-circolare_HR.pdf
- Montacchini E., Tedesco S., Fiorina S., Giusto L., 2019. "Da scarti tessili a ecoprodotti per l'edilizia: nuovi scenari di economia circolare", *International Conference 5R - Refuse, Reduce, Repair, Reuse, Recycle. “Recycling of wastes and drosses in buildings: from downcycling to upcycling towards the objectives of circular economy”*, Roma, 24 maggio.
- Pauli G., 2015. *The Blue Economy version 2.0: 200 Projects implemented, US \$4 Billion in-vested, 3 Million jobs created*, Academic Foundation.
- Serra V., Bianco L., Candelari E., Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., Schiavi A., 2017. "A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project", *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 333-352.
- Zamboni, S., 2011. *L'Italia della Green Economy. Idee, aziende, prodotti nei nuovi scenari globali*, Edizioni Ambiente, Milano.

3. Progettazione Life Cycle



3.1 La progettazione nel ciclo di vita in architettura

Oggi la progettazione architettonica deve necessariamente includere all'interno del processo di ideazione, quale espressione concreta di creatività e di ricerca progettuale, le caratteristiche proprie della sostenibilità di estendere la prospettiva alle generazioni future e di favorire l'interdisciplinarietà. Il progettista è quindi chiamato ad affrontare responsabilmente e con consapevolezza un processo progettuale complesso che comprende l'intero ciclo di vita dell'edificio e gli effetti che, nel tempo, la costruzione provocherà sull'ambiente e sugli abitanti.

In quest'ottica, direttive e regolamenti europei stanno promuovendo strategie a lungo termine e la pianificazione di azioni e misure per favorire la sostenibilità e l'efficienza energetica dell'edificio.

Partendo dal rapporto tra settore industriale ed edilizio, il presente capitolo intende analizzare il ruolo degli strumenti di progettazione basati sul ciclo di vita e in che modo tali strumenti possano essere integrati nel processo progettuale fin dalle prime fasi.

3.1.1 La progettazione integrata

Negli anni Cinquanta del Novecento, Walter Gropius affermava che a differenza del settore industriale, in architettura il prototipo e il prodotto finale sono una cosa sola (Gropius, 1963, pag. 101, ed. originale 1955). Secondo tale affermazione l'organismo edilizio rappresenta il risultato, unico e complesso, di una "filiera di edificio" che combina il concetto di "filiera di prodotto", caratteristico del campo industriale, con le esigenze degli attori coinvolti nell'intero ciclo di vita in un approccio di tipo sistemico. Negli stessi anni, si incomincia a prender coscienza del fatto che una struttura di progettazione debba necessariamente affrontare un processo sempre più complesso, che inizia dal progetto e continua per tutto il ciclo di vita dell'edificio o del singolo prodotto.

Alla fine degli anni Settanta Marco Zanuso invita ad una "riappropriazione" del processo progettuale secondo cui tutte le forze coinvolte nel progetto, quali committenti privati o pubblici, amministratori, tecnici e produttori, devono necessariamente "assumere e mantenere nel tempo e nello spazio l'iniziativa e la responsabilità del progetto fino al suo completamento e oltre" (Zanuso et al., 1977).

Nella stessa direzione, l'evoluzione digitale dell'ultima decade ha permesso di potenziare tale interdisciplinarietà del progetto e, quindi, le interazioni nel tempo tra l'edificio, i suoi componenti e gli utenti coinvolti.

Tuttavia, se da una parte il processo progettuale si è orientato verso una maggiore integrazione delle competenze, includendo strategie a lungo termine, dall'altra, tale processo ha comportato un aumento delle variabili da tenere in considerazione, non sempre facilmente identificabili e misurabili.

Francesca Thiebat

Professore Associato presso il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino.
E-mail: francesca.thiebat@polito.it



Figura 3.1.1 Sistema “automobile” con i componenti. Fonte: <https://www.flickr.com/photos/hahatango/2161518548> credits Aaron Tang <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

Il ciclo di vita in architettura

L’approccio *life cycle*, in generale, permette di riconoscere in che modo le nostre scelte, ad esempio l’acquisto di beni e servizi, facciano parte di un intero sistema. Tale approccio mette in evidenza sia i vantaggi che i rischi associati ad un prodotto o ad una tecnologia, a partire dalle materie prime fino allo smaltimento del bene a fine vita (UNEP, 2007).

Nonostante le numerose similitudini tra un processo di produzione industriale e un processo edilizio, la permanenza nel tempo di una costruzione è molto superiore a qualsiasi prodotto industriale. Tale permanenza, intesa come “durata fisica e funzionale”, può essere estesa nel tempo attraverso operazioni di manutenzione, sia programmate che impreviste, per l’adeguamento funzionale e tecnologico del manufatto e si distingue dalla durata delle parti che lo compongono.

La durata dell’edificio, frutto di una decisione assunta dal committente, dal proprietario o dal soggetto gestore, dipende principalmente dalla funzione che deve assolvere; mentre la durata dei suoi componenti deve essere ricavata dalle caratteristiche tecniche e funzionali delle parti stesse, dalla loro dislocazione nel manufatto edilizio e da fenomeni di obsolescenza (Molinari, 2002).

Il settore industriale si basa ormai da tempo sull’approccio del ciclo di vita, almeno secondo le prospettive del produttore e del consumatore¹. Osservando, ad esempio, l’industria automobilistica, il produttore considererà ogni singolo componente del sistema “automobile” dalla fase di ricerca e sviluppo e di progettazione fino alla fase di fine vita, passando dai processi di assemblaggio dell’auto e uso dei componenti, con lo scopo di immettere sul mercato un prodotto competitivo che soddisfi le normative vigenti (ad es. dal 2015 la Direttiva 2000/53/CE impone l’obbligo di recuperare almeno il 95% delle componenti che costituiscono il peso complessivo di ogni veicolo alla fine della loro vita). Il consumatore (utente finale) prenderà in considerazione il sistema “automobile” valutandone i vantaggi a partire dal momento dell’acquisto fino alla fine della vita economica (ovvero il momento in cui viene venduta o dismessa), considerando una vita funzionale di circa 10 anni.

Nel settore delle costruzioni le dinamiche sono più complesse. La prima difficoltà consiste nello stabilire la durata del ciclo di vita dell’edificio. Per alcune destinazioni d’uso la durata fisica o funzionale potrebbe superare la durata economica², come per gli edifici temporanei la cui vita economica va da poche ore a qualche mese (ad es. i padiglioni per le grandi esposizioni, le strutture per le emergenze, gli stand fieristici) o come, al contrario, per destinazioni d’uso di lunga durata (variabile da 50 a 100 anni), quali ad esempio gli edifici residenziali in cui possono cambiare gli utenti ma non tanto le esigenze. Per usi caratterizzati da un elevato tasso di innovazione, quali, tra gli altri, uffici, stabilimenti industriali, strutture sanitarie o edifici scolastici, la vita funzionale, spesso coincidente con la vita economica e più breve della vita fisica, è di circa 30-50 anni (Sukwon et al., 2021).

Una seconda difficoltà è quella di definire a priori le responsabilità degli attori coinvolti nella vita utile dell’edificio, spesso non ancora noti in fase di progetto. Il processo edilizio avviene in un arco di tempo che si sviluppa in tre momenti (Thiebat, 2019):

- il primo, guidato dal committente e coordinato dal progettista, è quello della “ideazione”, in cui si forma la squadra di progettazione, si definisce il *brief* e si progetta l’opera;
- il secondo momento è quello della “costruzione”, in cui i ruoli principali sono quelli del direttore dei lavori e del costruttore;
- il terzo momento è rappresentato dalla “vita” dell’edificio; qui i ruoli predominanti sono quelli dell’utilizzatore e del gestore dell’opera, ma anche la comunità stessa che indirettamente è coinvolta (Figura 3.1.2).

¹ Il ruolo della società non è infatti quasi mai considerato. Essa, nella maggior parte dei casi, subisce i costi indiretti associati alle attività di produttori e consumatori come l’inquinamento.

² La ‘durata’ può riguardare la durata fisica, consentita dai processi di degradamento fisico, in relazione alle prestazioni iniziali; la durata funzionale, consentita sia dalla “durata fisica” sia dai processi di obsolescenza in relazione alle esigenze; oppure la durata economica che corrisponde alla capacità dell’edificio di garantire un reddito e possedere un valore economico.



Figura 3.1.2 Schema del processo edilizio suddiviso nei tre momenti principali (ideazione, costruzione, vita utile). Fonte: elaborazione da Thiebat, 2019.

3.1.2 Strumenti e normativa per la progettazione nel ciclo di vita

Per rispondere agli obiettivi climatici dell'Unione Europea che prevedono la neutralità climatica entro il 2050 (Reg. CEE/UE 30 giugno 2021, n. 1119), gli stati membri stanno accelerando lo sviluppo di metriche, target di riferimento e regolamenti relativi al settore delle costruzioni, responsabile del 36% delle emissioni di CO₂. In Francia, ad esempio, è entrato in vigore nel 2022 il regolamento ambientale RE20 che sostituisce il regolamento energetico e implementa le prestazioni energetiche della fase di esercizio con le emissioni dell'edificio durante il suo ciclo di vita, dalla fase di costruzione alla fine della sua vita. Il regolamento francese prevede che venga calcolata l'impronta di carbonio del nuovo edificio secondo dei target di riferimento. Ad esempio per un edificio residenziale unifamiliare, l'impronta deve essere inferiore a 640 kgCO₂eq/m² per la fase di costruzione e a 160 kgCO₂eq/m² per il consumo energetico in fase d'uso (valori massimi al 2024).

A livello normativo, nell'ambito delle costruzioni, si sta sviluppando un grande interesse sul tema del ciclo di vita sia a livello internazionale che nazionale. Nell'ambito delle costruzioni alcuni gruppi di lavoro internazionali ed europei, quali ad esempio l'ISO/TC59/SC17 *Sustainability in building constructions* e il CEN/TC 350 *Sustainability of construction works*, stanno elaborando metodologie per promuovere, in modo armonizzato, l'applicazione di strumenti e metodi per la sostenibilità di edifici nuovi o esistenti, sia dal punto di vista ambientale, che economico e sociale rispondendo ai tre pilastri della sostenibilità. Emerge quindi l'importanza crescente di includere nelle fasi di progetto tali aspetti, elaborando scenari delle fasi di vita successive a quella di costruzione sia in termini di costo sia in termini di consumo energetico e di inquinamento.

I lavori dell'ISO e del CEN sulla valutazione della sostenibilità sono conformi alle norme ISO 14020 che definiscono gli standard internazionali sull'etichettatura ambientale, nonché alle ISO 14040 sul *Life Cycle Assessment* (LCA), alla ISO 15686-5 sul *Life Cycle Costing* (LCC) e alla ISO 15392 sui principi generali di sostenibilità nella costruzione di edifici.

Nel 2017 il Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea ha lavorato a stretto contatto con le parti interessate del settore edilizio per sviluppare un quadro comune denominato Level(s): un insieme di metriche per misurare la performance di sostenibilità degli edifici durante tutto il loro ciclo di vita. Si basa su strumenti e norme esistenti, e include indicatori relativi a energia, materiali, acqua, salute, comfort, cambiamento climatico, costi nel ciclo di vita (Dodd et al. 2017). Tra gli strumenti analitici per progettare in ottica di ciclo di vita, si evidenziano il *Life Cycle Assessment* (LCA), definito dalla norma ISO 14040 -44, e *Life Cycle Costing* (LCC), secondo la ISO 15686-5.

Nel condurre uno studio LCA o LCC occorre stabilire a priori il "periodo di analisi", che corrisponde alla durata dello studio e che non coincide, necessariamente, con la durata fisica del bene, ad esempio, per l'analisi dei costi, esso corrisponderà alla sua "durata economica",

che presuppone obbligatoriamente la conservazione della durata fisica e di quella funzionale. Data la complessità delle informazioni da gestire e la molteplicità delle esigenze e dei requisiti da soddisfare nelle applicazioni in ambito architettonico, l'uso di strumenti, digitali e non (come software, matrici, piattaforme), può facilitare i vari attori coinvolti nel mettere a punto strategie e soluzioni da adottare per il controllo e la validità dei principi di sostenibilità per l'intera durata dell'edificio.

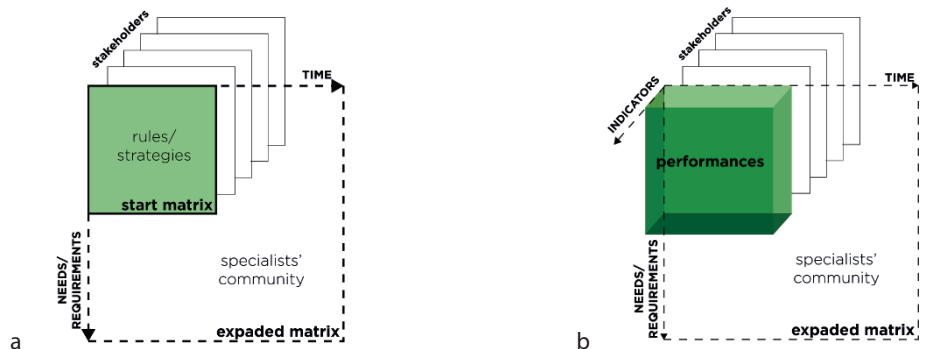
La *European Union Public Procurement Directive* (EUPPD) del 15/01/2014 ha raccomandato l'utilizzo di strumenti elettronici supportati da tecnologia BIM, riconoscendone i possibili vantaggi. In Italia la Direttiva è stata recepita dal Codice Appalti (D.Lgs 50/2016) e dal successivo decreto attuativo. L'adozione del BIM permette, infatti, di integrare e mantenere traccia dei dati progettuali e decisionali nel tempo, garantendo l'immediata disponibilità del piano di manutenzione dell'opera e del modello *as-built* sempre aggiornato e corredato da tutta la documentazione. La metodologia prevede che il modello progettuale (*Building Information Model* - BIM) evolva in quello costruttivo (*Project Information Model* - PIM) e alla fine in quello gestionale (*Asset Information Model* - AIM) completo di informazioni e dati utili agli utenti che dovranno gestire e mantenere l'edificio, lungo l'intera durata del manufatto. Ma come controllare tale complessità già nella fase ideativa del processo progettuale?

La progettazione architettonica, sempre più orientata verso un approccio integrato e sostenibile che tiene conto dell'intera vita dell'edificio, dovrà prendere in considerazione le esigenze potenziali di tutti soggetti coinvolti sia in modo diretto, quali ad esempio i committenti, i progettisti, i costruttori e gli utenti finali, sia in modo indiretto, come la società e l'ambiente. Nelle prime fasi progettuali è quindi importante definire lo scenario del ciclo di vita dell'edificio in quanto le decisioni che si assumono all'inizio del processo di progettazione avranno un impatto sulle prestazioni e sui costi in fase di esercizio e fine vita (Orstergard, 2016).

La matrice di progetto (*Life Cycle Design Matrix*)

La prospettiva del ciclo di vita richiede alle parti interessate di cooperare in nuovi modi. La progettazione integrata consente un approccio olistico e la considerazione continua di un gran numero di aspetti. In tale ottica, al fine di facilitare la gestione del progetto tra il *team* di progettazione e gli *stakeholder* coinvolti, nasce la necessità di una struttura che metta in relazione le esigenze, i requisiti e le prestazioni; che sia scalabile in funzione dello sviluppo del progetto; e, infine, che tenga in considerazione, oltre alla fase di progettazione, anche la costruzione dell'opera, il suo utilizzo, la sua gestione nel tempo e i possibili scenari alla conclusione della sua vita utile. La scelta è quella di rappresentare, sotto forma di una o

Figura 3.1.3 Processo progettuale del ciclo di vita (*Life Cycle Design approach*): i diagrammi mettono in relazione le fasi temporali del ciclo di vita dell'edificio con gli attori coinvolti e con le informazioni/dati disponibili, che diventano più completi con l'avanzamento del progetto fino alla fase di esercizio. Fonte: elaborazione da Thiebat, 2019 da <https://www.flickr.com/photos/hahatango/2161518548> credits Aaron Tang <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

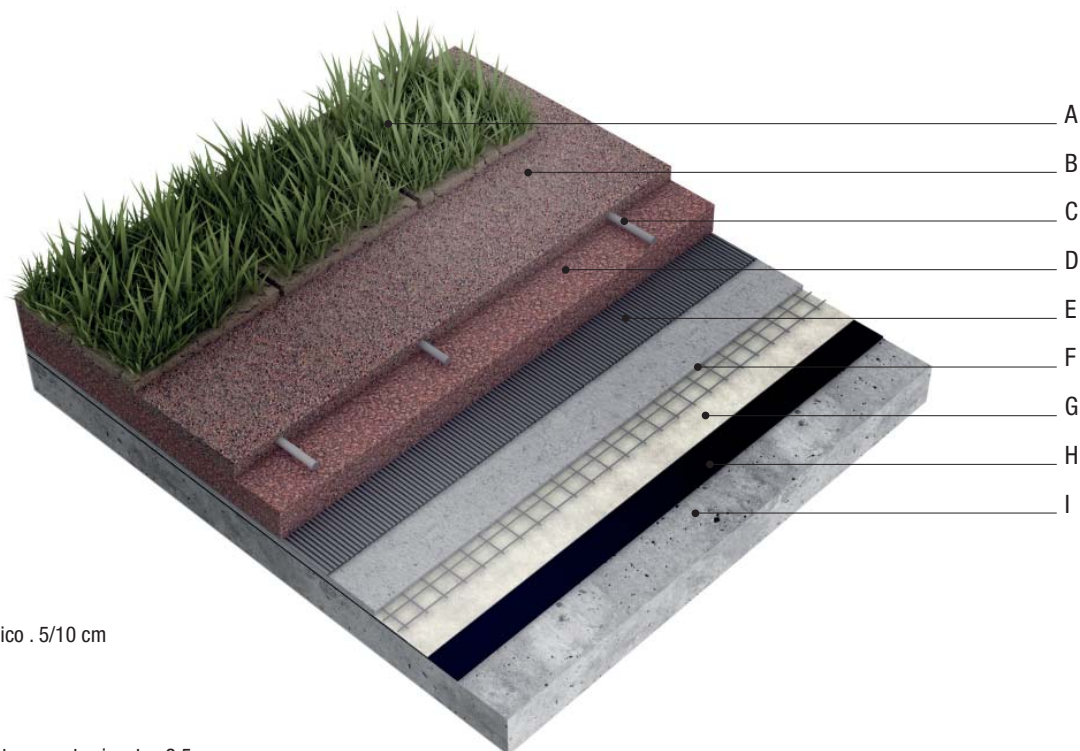


più matrici, le esigenze dei vari attori coinvolti e le caratteristiche prestazionali delle parti dell'edificio in modo da visualizzare e risolvere le interazioni e interferenze che possono sorgere anche con il supporto di ambiti disciplinari diversi.

I progettisti, attraverso una piattaforma di condivisione (*Design Matrix*), possono quindi definire e analizzare le strategie progettuali insieme agli attori coinvolti nella vita dell'edificio (Figura 3.1.3). La matrice, nella fase iniziale del progetto, raggruppa le informazioni e i dati necessari alla definizione del quadro esigenziale-prestazionale considerando l'intera durata funzionale dell'opera. Nel corso del progetto, essa viene perfezionata e implementata fino ad includere gli indicatori prestazionali misurati con modelli di calcolo specifici.

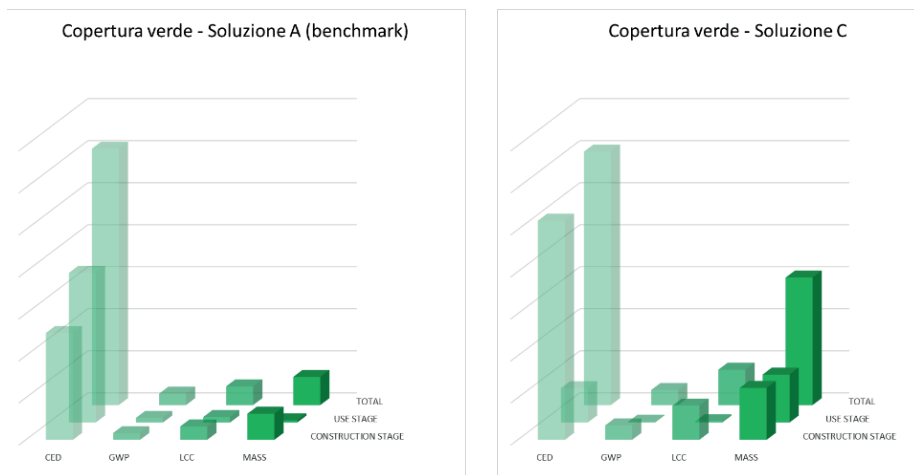
In altre parole, nella fase iniziale del progetto, cliente e progettista, partendo dalla definizione del quadro delle esigenze e dei vincoli, costruiscono la prima matrice in cui si individuano le 'regole' del progetto (Figura 3.1.3-a). Successivamente si coinvolgono gli 'specialisti' (ad esempio, ingegnere strutturista, termotecnico, geotecnico, urbanisti, utilizzatori finali e altri specialisti necessari) e i 'non esperti' (ad esempio, i cittadini interessati, la Pubblica Amministrazione, etc.), selezionati per numero e per ruolo in base al tipo di progetto (destinazione d'uso, rapporto con il sito, etc.), con i quali si elaborano le esigenze e i requisiti del progetto di fattibilità. Il coordinatore del *team*, a questo punto, può definire le linee progettuali e produrre il progetto definitivo da condividere, verificare e rivedere con gli altri soggetti coinvolti, e così via per le fasi progettuali successive, fino ad arrivare al calcolo degli indicatori di prestazione nel progetto esecutivo (Figura 3.1.3-b).

Figura 3.1.4 Una soluzione tecnologica del progetto della copertura verde per un edificio adibito ad uffici e laboratori a Mantova. Fonte: BuonomoVeglia srl e PAT.



- A . manto erboso in zolle
- B . torba miscelata con lapillo vulcanico . 5/10 cm
- C . tubo sub-irrigazione
- D . lapillo vulcanico . 5/10 cm
- E . geodreno . 1 cm
- F . strato di protezione in malta armata con rete zincata . 2.5 cm
- G . tessuto / non tessuto
- H . doppia guaina bituminosa
- I . soletta strutturale

Figura 3.1.5 Applicazione delle matrici progettuali ad un caso studio per l'analisi ambientale ed economica nel ciclo di vita di due soluzioni tecnologiche a confronto (a: Soluzione A – BAU; b: Soluzione C). Le matrici rappresentano graficamente gli indicatori di impatto (CED, GWP, LCC, MASS). Sull'asse x gli indicatori, sull'asse y le fasi del ciclo di vita considerate e sull'asse z le quantità. Fonte: Thiebat, 2019.



Esempio applicativo della Design Matrix al progetto

Le figure 3.1.4 e 3.1.5 mostrano l'applicazione della matrice ad un caso studio, il progetto di una copertura verde per un edificio adibito ad uffici e laboratori a Mantova (progettisti: BuonomoVeglia srl e PAT.). Il tetto verde, elemento caratterizzante del progetto, deve soddisfare diversi requisiti prestazionali, quali in particolare:

- garantire un elevato isolamento termico per ridurre il fabbisogno di energia nella fase d'uso e le relative emissioni di anidride carbonica;
- mimetizzare il costruito nel parco naturale esistente;
- ridurre il peso della copertura per limitare la sezione delle travi in acciaio;
- aumentare la massa esposta nei locali interni per contribuire al sistema della ventilazione naturale;
- minimizzare l'impatto ambientale del costruito in termini di energia e CO₂ inglobata;
- non eccedere il budget previsto dalla stazione appaltante per i costi di costruzione.

Con l'obiettivo di rispondere ai requisiti progettuali individuati, il team di progettazione ha rappresentato attraverso la matrice (*Design Matrix*) gli indicatori prestazionali da calcolare che hanno effetti lungo l'intera vita utile dell'edificio.

La matrice, in questo caso, ha l'obiettivo di facilitare il confronto tra diverse opzioni tecnologiche.

Tra gli indicatori di impatto sono state valutate nella fase preliminare di progetto le prestazioni ambientali (l'energia primaria inglobata nei materiali – CED e le emissioni di gas a effetto serra - GWP), le prestazioni energetiche (Trasmittanza termica e inerzia termica- MASS) e i costi nel ciclo di vita (*Life Cycle Costing* - LCC).

Gli indicatori sono stati calcolati su una soluzione "Business as usual" (benchmark), scelta in base al costo di fornitura e posa più basso, e su tre opzioni alternative (A, B, C) che rispondessero ai requisiti di progetto. La fig. 3.1.5 mostra ad esempio le *Design Matrix* di due soluzioni (Benchmark e soluzione C). Ogni indicatore è rappresentato sull'asse delle x (CED, GWP, LCC, MASS).

Nonostante le quantità siano espresse in unità di misura diverse, gli indicatori possono essere esaminati in forma disaggregata per ciascuna fase del ciclo di vita. La matrice permette inoltre di valutare graficamente le relazioni tra gli andamenti dei diversi indicatori di impatto per le diverse opzioni analizzate.

In un processo progettuale così strutturato, da una parte, diventa più semplice mantenere la coerenza e le connessioni delle scelte effettuate lungo il processo di progettazione, e dall'altra, si assicura la possibilità di compiere ottimizzazioni sia in fase di progetto che in fase d'uso.

Nel caso studio riportato, si può osservare ad esempio che nella soluzione C (Fig. 3.1.5 b) il consumo di risorse CED è più elevato nella fase iniziale rispetto al *benchmark* di riferimento, ma si riduce notevolmente nella fase d'uso per l'alta durabilità dei componenti. Se si osserva la matrice relativa alla soluzione BAU infatti, il consumo di risorse aumenta nella fase d'uso a causa del tasso di sostituzione elevato di alcuni componenti della stratigrafia e aumenta anche il valore totale. Gli altri indicatori mostrano invece una maggiore incidenza nella Soluzione C.

La matrice, facilitando il dialogo tra progettisti e committenti, permette quindi di tenere sotto controllo durante il processo progettuale non solo impatti ambientali e costi relativi alla fase di costruzione ma anche gli effetti lungo l'intero ciclo di vita non sempre visibili e tenuti in considerazione.

La "matrice progettuale", sviluppata inizialmente in ambito di ricerca, è attualmente in fase di sperimentazione anche nell'ambito della pratica professionale quale strumento per favorire lo scambio interdisciplinare di conoscenza, l'elaborazione dei parametri tecnici in forma integrata, il rispetto dei tempi e la comunicazione del progetto. Tale strumento può, inoltre, favorire l'uso di strumenti BIM per la diffusione del processo progettuale integrato basato sull'approccio *Life Cycle*.

3.1.3 Conclusioni

L'espressione creativa dell'architetto deve essere estesa ad un approccio sistemico del progetto combinando la creatività con un processo analitico e scientifico. Tale attività deve essere obiettivo comune dell'intero *team* di progettazione ed essere estesa all'intera vita dell'edificio e ai suoi utenti.

Un simile approccio può essere già individuabile nell'opera di Jean Prouvé il cui obiettivo principale era il trasferimento dalla tecnica della produzione dall'industria all'architettura. Nel prototipo della Maison Tropicale o quello della Maison Metropole, costruzioni pensate per le emergenze abitative degli anni '50, tutti i componenti, impilabili e leggeri, sono studiati per rispondere tanto alla logica della fabbricazione e del trasporto quanto a comfort e solidità della fase d'uso.

Emblematico di un'architettura sperimentale pensata, oggi possiamo dire, in ottica *Life Cycle* è anche il lavoro condotto dagli Eames fondato sull'idea di un possibile trasferimento tecnologico da settori industriali, come quello militare e aeronautico, a quello delle costruzioni.

Nella *Case Study* #8 - Eames House, costruita nel secondo dopoguerra a Los Angeles, ad esempio, i componenti di involucro sono stati assemblati alla struttura principale in acciaio in poco più di un giorno impiegando materiali e tecnologie sperimentati nella Seconda Guerra Mondiale con l'obiettivo di minimizzare l'uso dei materiali e massimizzare il volume interno (Steele, 1994).

Secondo una recente ricerca³, la Eames House e la Maison Métropole hanno un'impronta di carbonio⁴ rispettivamente pari a 93 kgCO₂eq/m² e 122 kgCO₂eq/m², molto inferiore al *target* di riferimento del regolamento francese RE20 (Namias, 2022).

³ L'esposizione "L'empreinte d'un habitat, construire léger et décarboné", Parigi 22.10.2021-27.02.2022, curata dall'arch. P. Rizzotti analizza l'impatto ambientale di alcuni edifici storici noti e mostra come tali progetti abbiano un'impronta di carbonio ben al di sotto delle soglie fissate dal regolamento ambientale del 2022 (RE20).

⁴ A cui occorre aggiungere 80 kgCO₂eq/m² per l'adeguamento prestazionale agli attuali standard energetici (corrispondente alla quota di isolamento termico aggiuntivo) economico.

A partire dagli anni '90 sono stati elaborati strumenti per calcolare e valutare gli effetti delle costruzioni nel tempo avvicinando l'idea del sistema 'edificio' a quello del componente industrializzato.

Oltre al BIM, precedentemente citato, un esempio è quello dei sistemi per la valutazione della sostenibilità finalizzati ad una progettazione di tipo olistico, in cui ogni requisito prestazionale può essere considerato singolarmente, ma anche all'interno di un sistema più complesso costituito dall'edificio quale integrazione di architettura, struttura, impianti e spazi esterni.

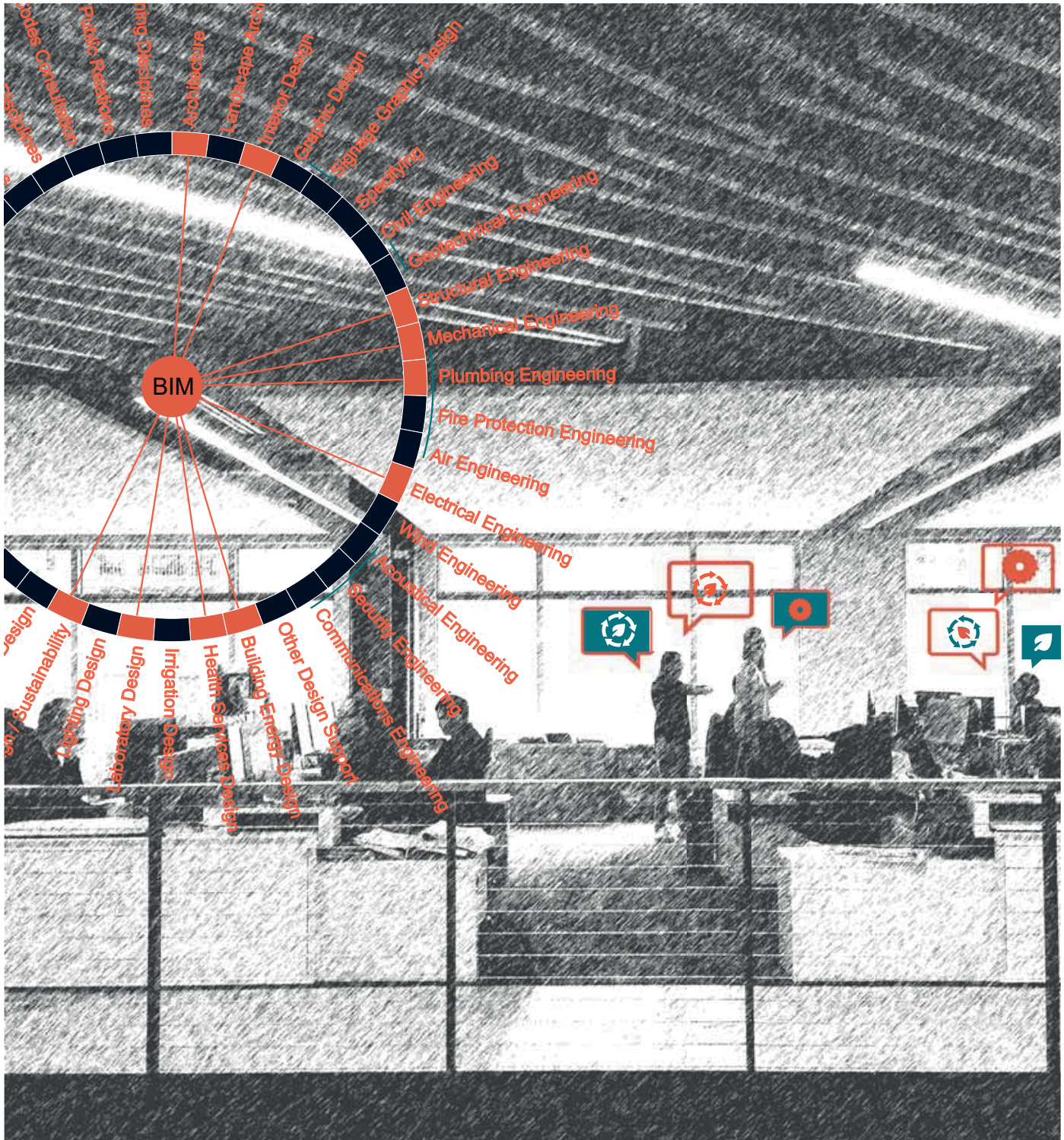
In particolare i sistemi di certificazione di ultima generazione (DGNB, LEED, BREEAM), oltre a formalizzare con indicatori e punteggi il livello di equilibrio tra i vari fattori che influiscono sul raggiungimento del grado di sostenibilità (fattori energetici, ambientali, sociali, economici), tentano di prendere in considerazione l'intero ciclo di vita di un edificio.

Si può affermare che, aumentando la complessità del progetto, sia indispensabile facilitare i progettisti verso un approccio alla progettazione del ciclo di vita che possa garantire una maggiore consapevolezza già dalle prime fasi di progetto.

Strumenti di condivisione, come la *Design Matrix*, usati già nel *concept design* permetteranno di integrare con più facilità dati e indicatori specifici nelle fasi avanzate del progetto evitando la separazione tra gli aspetti tecnici della costruzione e le istanze culturali proprie della fase ideativa del progetto.

Bibliografia

- Dodd N., Cordella M., Traverso M., Donatello S., 2017. *Level(s)—a common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, Part 1, 2 and 3*. European Commission, JRC
- Gropius W., 1963 (ed. originale 1955). *Architettura integrata*, il Saggiatore, Milano.
- ISO 14040:2006. *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework*
- ISO 14044:2006. *Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines*
- ISO 15686-5:2017. *Building and constructed assets—service life planning—life cycle costing*
- Molinari C., 2002. *La manutenzione come requisito di progetto*, Sistemi Editoriali, Napoli.
- Namias O., 2022. "De la difficulté de calculer la vraie empreinte carbone d'un bâtiment", in *Dossier Bas Carbone*. AMC n. 304, Avril 2022, Groupe Moniteur
- Østergård T., Jensen R.L., Maagaard S., 2016. "Building simulations supporting decision making in early design: A review", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 187–201.
- Remmen A., Jensen A.A., Frydendal J., 2007. *Life cycle management. A business guide to sustainability*, UNEP.
- Steele J., 1994. "Charles and Ray Eames Eames House", in B. Dunlop and D. Hector (eds), *Twentieth Century Houses (Architecture 3s)*. London: Phaidon Press Limited.
- Sukwon Ji, Bumho Lee, Mun Yong Yi, 2021. "Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using machine learning: A big data approach", *Building and Environment*, vol. 205.
- Thiébat F., 2019. *Life cycle design*, Springer Nature, Cham.
- Zanuso M., Tubi N., Weber H. (eds), 1977. *La progettazione integrata per l'edilizia industrializzata* (cycle of general teaching debates), ITEC, Milano.



3.2 Informazioni LCA come driver del processo decisionale nelle strutture di progettazione: creazione di un life cycle database di progetto in ambiente BIM

Per rispondere agli obiettivi dettati dalla Agenda 2030, è oggi più che mai necessario coinvolgere i principali attori responsabili dell'ambiente costruito: le società di architettura, di ingegneria ma anche le imprese di costruzione (*AEC firms*) al fine di implementare al loro interno – nel loro modo di progettare e di agire – una prospettiva *life cycle*. A partire dall'esplorazione etnografica della pratica corrente in termini di: i) competenze coinvolte; ii) strumenti utilizzati; e iii) dati attualmente considerati, nonché del relativo flusso di informazione e impatto all'interno del processo decisionale, il contributo mira a supportare le strutture di progettazione nel passaggio dalla pratica attuale alla pratica *life cycle*. A tal fine viene proposto un *assessment framework* per supportare nel cambiamento gli operatori coinvolti, ripartendo i ruoli e attivando a partire dalle prime fasi del processo edilizio un flusso di informazioni orientato alla raccolta sistematica delle informazioni *life cycle* per realizzare un *life cycle database* di progetto in ambiente BIM. Esso permette non solo di accrescere la consapevolezza e il *know-how* riferito al ciclo di vita degli edifici, ma anche di agevolare la fase di inventario necessaria per lo sviluppo di studi *Life Cycle Assessment* e *Life Cycle Costing* e quindi la loro applicazione nel settore edilizio.

3.2.1 Implementazione di studi LCA nelle strutture di progettazione

A fronte degli ingenti impatti ambientali causati dal settore delle costruzioni, l'implementazione di una prospettiva *life cycle* viene sempre più promossa non solo a livello internazionale dai *Sustainable Development Goals* ma anche dai *Green Building Rating System* (es. LEED, BREEAM, DGNB). Le strutture di progettazione vengono così sempre più sollecitate ad eseguire studi *life cycle* in fase di progetto (Anand e Amor, 2017; Renz et al, 2016; Dossche et al, 2017) al fine di: i) operare scelte consapevoli a lungo termine e più precisamente nell'intero ciclo di vita dal punto di vista ambientale (LCA – *Life Cycle Assessment*) ma in alcuni casi anche economico (LCC – *Life Cycle Costing*); ii) favorire e rafforzare la sensibilità dei diversi professionisti circa gli impatti causati dal settore edilizio; iii) promuovere un cambio di mentalità nel modo di pensare, agire e operare necessario per salvaguardare le risorse disponibili e tutelare l'ambiente senza comprometterne il loro utilizzo alle generazioni future. È importante però sottolineare che se i primi due intenti mirano, tramite la quantificazione e valutazione, a rendere i progettisti consapevoli degli impatti degli edifici nell'intero ciclo di vita; il terzo intento intende impegnare personalmente i progettisti a ridurre in fase di progettazione tali impatti, garantendo al tempo stesso le performance e le qualità richieste. In quest'ultimo caso, viene quindi completamente cambiato il ruolo che i progettisti rivestono in prospettiva *life cycle*: da passivo, quando svolgono tali attività esclusivamente in quanto imposte e richieste da terzi (es. committenti, certificazioni, normative), ad attivo, quando vengono mossi da una volontà propria, facendo diventare l'approccio *life cycle* come

Anna Dalla Valle

Architetto, PhD e assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano, Unità di ricerca LifeCycleTEAM.
E-mail: anna.dalla@polimi.it

parte integrante della filosofia progettuale e del processo decisionale, in modo sistemico ed olistico (Boecker et al, 2009; Rusu e Popescu, 2018).

Per supportare le strutture di progettazione nel soddisfacimento dei primi due intenti, nel corso degli anni sono stati sviluppati numerosi software LCA specifici per il settore edilizio per avvicinare e semplificare la metodologia LCA anche ai non esperti (Al-Ghamdi e Bilec, 2017). Inizialmente si è trattato di software *stand-alone* (es. Legep, Athena, OpenLCA) che, rispetto ai tradizionali software LCA (es. SimaPro e Gabi), contengono solo i *dataset* relativi ai materiali e ai processi caratteristici per il settore delle costruzioni (spesso la gamma è limitata) e presentano un'interfaccia *user-friendly* a discapito però della trasparenza delle informazioni contenute, che si configurano spesso come *black box*. In seguito, dal momento che tali strumenti venivano utilizzati solo a progetto finito e non influivano quindi sulle scelte progettuali, sono state sviluppate diverse metodologie volte a sfruttare le potenzialità offerte dal BIM – *Building Information Modeling* (Succar e Kassem 2015; Lu et al, 2017), in quanto metodo attualmente adoperato per la progettazione (ma non solo). Scopo è di rendere interoperabili i database LCA con il BIM in modo tale da promuovere in fase di progettazione lo sviluppo di studi LCA (Kovacic e Zoller, 2015; Röck et al, 2018; Soust-Verdaguer et al, 2017), in alcuni casi combinati con le più svariate analisi progettuali (Jalaei e Jrade, 2014; Santos et al, 2019), al fine di incidere più profondamente sul processo decisionale. Per facilitare ulteriormente l'applicazione della metodologia LCA in fase progettuale ed evitare processi manuali (permanenti anche nelle metodologie LCA-BIM) soprattutto per l'elaborazione dell'inventario, che costituisce per i progettisti la fase più impegnativa, sono stati sviluppati software LCA intesi come BIM *plug-in* (es. Elodie, Tally) (Bueno e Fabricio, 2018). Fine ultimo è integrare la metodologia LCA direttamente nel BIM per facilitare nel corso del processo e rendere più automatico il calcolo, l'inserimento e l'aggiornamento dei dati di inventario, agevolando l'applicazione LCA a partire dalle prime fasi progettuali. Tuttavia, dal momento che nei metodi integrati LCA-BIM permane il problema della mancanza di informazioni nelle fasi di *concept*, sono stati sviluppati ulteriori metodi per supportare i progettisti ad applicare valutazioni LCA a inizio progetto. Essi, in particolare, orientano le scelte preliminari tramite funzioni di probabilità basate sui cosiddetti *functional database*, ossia banche dati contenenti le informazioni LCA di tutte le soluzioni tecnologiche e i materiali da costruzione comunemente adoperate nel contesto di riferimento (Dupuis et al., 2017; Rezaei et al, 2019). Obiettivo primario è infatti non solo quantificare gli impatti ambientali scaturiti dal progetto/edificio in esame quanto quello di influire sul processo decisionale, anticipando quindi le valutazioni LCA alle fasi preliminari, dove le scelte cruciali vengono intraprese, e non a progetto finito, quando vi è poco margine per effettuare modifiche, ottimizzazioni e miglioramenti. Tale obiettivo va però a scontrarsi con il fatto che per elaborare uno studio LCA di edificio è necessario reperire una notevole quantità di informazioni e dati la maggior parte dei quali vengono stabiliti solo in uno stadio avanzato di progetto (es. materiali e quantità di tutte le parti d'opera). In aggiunta tale fattore risulta particolarmente critico poiché, a differenza degli altri settori industriali dove i prodotti vengono fabbricati in serie, tramite processi e vita utile di breve durata, i manufatti edilizi costituiscono dei sistemi estremamente più complessi, unici e non ripetibili, realizzati tramite processi che coinvolgono innumerevoli operatori, materiali e sotto-processi e generalmente caratterizzati da lunghi cicli di vita. Pertanto, se negli altri ambiti la metodologia LCA può essere applicata a prodotti finiti che possono poi essere migliorati e rimessi in commercio, in edilizia tale processo non è possibile: le scelte intraprese a partire dalle prime fasi progettuali incidono profondamente sull'intero ciclo di vita, conferendo notevoli responsabilità (anche se spesso non accreditate) ai progettisti.

3.2.2 Informazioni LCA dalla pratica corrente alla pratica di progettazione *life cycle*

Dato che ad oggi la presenza di *functional database* è spesso inesistente e/o limitata e che la mancanza di informazioni costituisce la principale barriera per effettuare studi LCA a partire dalle prime fasi progettuali, l'attenzione viene di seguito concentrata sulla pratica corrente per comprendere non solo quali sono i dati attualmente disponibili, ma anche come viene attualmente gestito il flusso di informazioni durante il processo. In particolare, l'interesse è volto ai dati quantitativi (*foreground system*), essendo di responsabilità diretta dei progettisti per una valutazione LCA del settore edilizio, tralasciando i dati ambientali associati (*background system*) poiché demandati a database specifici e/o EPD – *Environmental Product Declaration* (EC-JRC 2012).

In quest'ottica, a seguito di un'esplorazione etnografica condotta sul campo¹ all'interno di una struttura di progettazione integrata (*A/E firm*) affermata a livello internazionale e dall'analisi di diversi casi studio, è possibile affermare che alcune informazioni LCA (informazioni quantitative richieste da normativa per lo sviluppo di studi LCA di edificio) vengono attualmente già considerate, coinvolgendo le più svariate discipline. Tuttavia, nonostante il processo decisionale dipenda da progetto a progetto oltre che da un'infinità di fattori al contorno, nella pratica tradizionale tale flusso di informazioni viene inteso come una serie di relazioni univoche tra diversi attori, che forniscono informazioni direttamente (a richiesta) o indirettamente (tramite report) ai soggetti incaricati dell'elaborazione delle analisi ambientali e *life cycle* di progetto.

Ad esempio, gli esperti di energia vengono generalmente incaricati dello sviluppo delle analisi energetiche oltre che, se richiesto, degli studi LCC. Per fare ciò, avendo bisogno di informazioni e dati che dipendono strettamente da altre discipline, essi sono soliti interagire con architetti, ingegneri meccanici, elettrici e idraulici, estimatori e, in alcuni casi, con i produttori stessi per reperire le informazioni di rispettiva competenza utili anche in prospettiva *life cycle*. In questo modo alcune informazioni LCA sono tuttora prese in considerazione, influenzando a seconda dei casi in fasi specifiche o nell'intero processo decisionale. Inoltre, altre informazioni LCA coincidono con le richieste incluse all'interno dei diversi protocolli di sostenibilità per il raggiungimento di alcuni crediti. In questo caso il soggetto incaricato è tipicamente l'esperto di sostenibilità, il quale, se per alcuni crediti è autonomo nella produzione della relativa documentazione, per altri deve coordinarsi con le restanti discipline coinvolte, collaborando con essi ad esempio per tutte le questioni relative a: materiali/prodotti di provenienza sostenibile e a bassa emissione, gestione dei rifiuti da costruzione, impianti volti a migliorare le prestazioni energetiche e la qualità dell'aria interna. Come si evince, la pratica corrente include parte delle informazioni LCA all'interno del processo, svelandone la loro potenziale disponibilità a supporto di studi LCA. Il problema è che ad oggi, nonostante la gamma di software disponibili sul mercato, le strutture di progettazione sono ben lontane dall'adottare un approccio *life cycle* e le informazioni LCA, facendo riferimento a molteplici discipline affrontate nei più svariati documenti, sono difficili da rintracciare e collezionare, implicando un notevole dispendio di tempo e risorse.

Per sopperire a tale condizione, il BIM risulta essere una soluzione praticabile, offrendo la possibilità ai diversi progettisti non solo di modellare i rispettivi sistemi di competenza ma anche di arricchire il modello con una serie potenzialmente infinita di attributi informativi, incluse le informazioni LCA. L'aspetto particolarmente vantaggioso è che, ove possibile, le informazioni e i dati di un qualsiasi prodotto/componente/sistema sono strettamente correlati al rispettivo oggetto nel modello geometrico tridimensionale, creando un complesso sistema

¹ Dalla Valle A., 2019. *Environment-driven Change Management in AEC Firms*, Tesi di dottorato, supervisors: Prof. Andrea Campioli, Prof. Monica Lavagna, Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering, XXXI cycle, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.

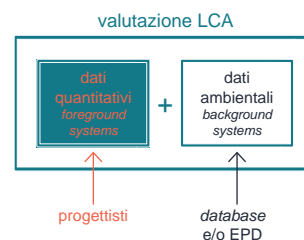


Figura 3.2.1 Focus sulle informazioni LCA del *foreground system*.

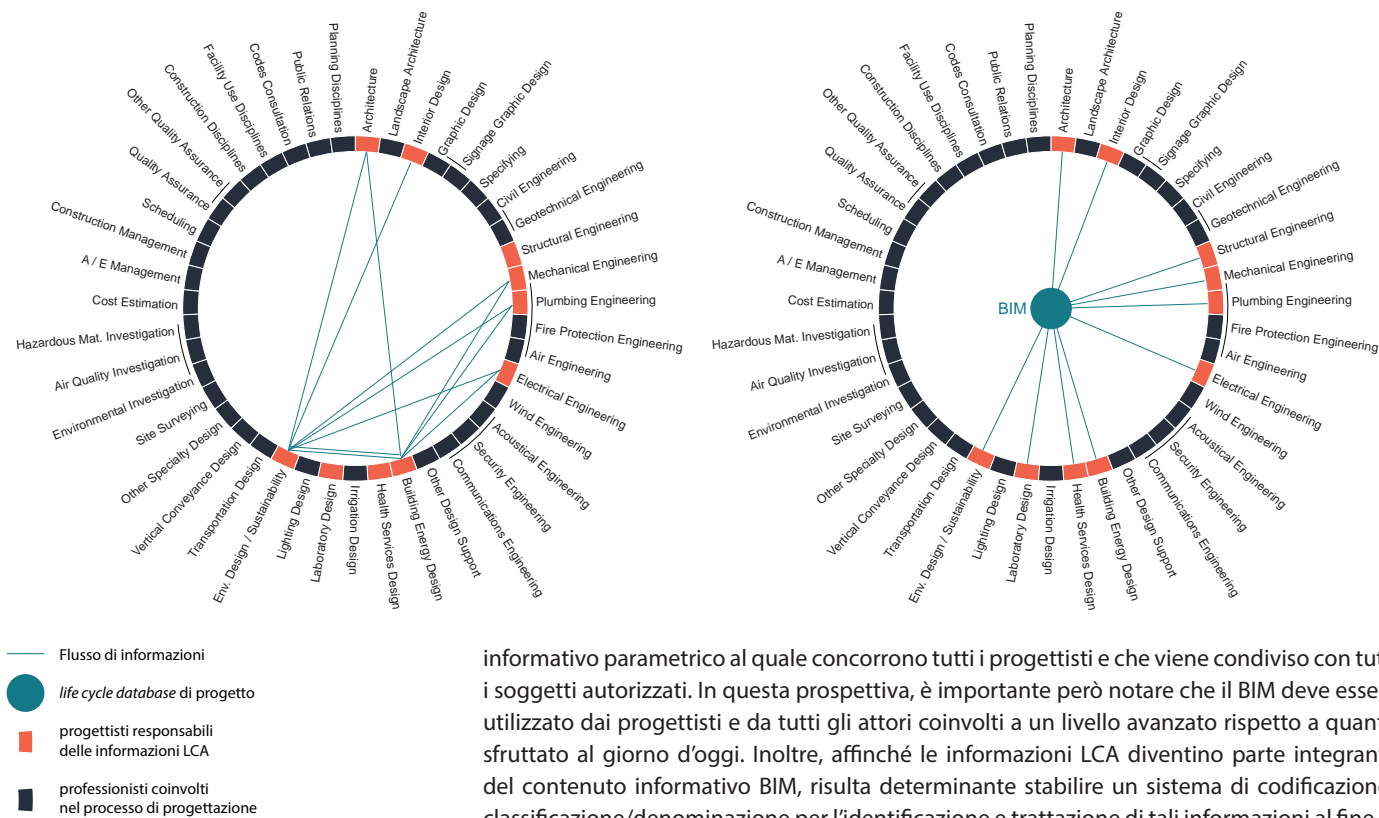


Figura 3.2.2 Confronto tra il flusso di informazioni della pratica corrente rispetto a quello di una pratica *BIM-oriented*.

informativo parametrico al quale concorrono tutti i progettisti e che viene condiviso con tutti i soggetti autorizzati. In questa prospettiva, è importante però notare che il BIM deve essere utilizzato dai progettisti e da tutti gli attori coinvolti a un livello avanzato rispetto a quanto sfruttato al giorno d'oggi. Inoltre, affinché le informazioni LCA diventino parte integrante del contenuto informativo BIM, risulta determinante stabilire un sistema di codificazione/classificazione/denominazione per l'identificazione e trattazione di tali informazioni al fine di costituire un linguaggio condiviso tra la molteplicità delle discipline interessate. In questo modo, se opportunamente definite e integrate, le informazioni LCA potrebbero essere progressivamente associate ai relativi oggetti, organizzate e sistematizzate all'interno del contenuto informativo BIM o eventualmente, data la pluralità di informazioni richieste, in un LCA-BIM *plug-in* specifico, creando un *life cycle database* di progetto in ambiente BIM, continuamente integrato e consultato da tutti gli attori abilitati. Ciò risulterebbe estremamente strategico in quanto le informazioni LCA non risulterebbero più eterogenee tra loro e contenute nei più disparati documenti, bensì disponibili in un singolo *database*, facilitando non solo la raccolta delle informazioni durante il processo ma anche una visione d'insieme ed olistica del progetto e, di conseguenza, il loro impiego come dati di *input* per lo sviluppo di studi LCA di edificio (ma non solo). Inoltre, la richiesta di inserire e dichiarare le informazioni LCA in fase di progettazione, indurrebbe implicitamente i progettisti a tenerle in considerazione durante il processo decisionale, tralasciando l'obiettivo ormai prioritario di passare dalla pratica attuale alla pratica *life cycle*.

3.2.3 Sviluppo di un *life cycle database* di progetto in ambiente BIM

L'estrema eterogeneità del settore, la molteplicità delle discipline, la disgregazione dei soggetti coinvolti, nonché la quantità di informazioni interessate rende la creazione di un *life cycle database* di progetto come una sfida cruciale per le strutture di progettazione,

apportando cambiamenti radicali nel modo di concepire la produzione del progetto (Dalla Valle et al., 2018). Infatti, così come definito nel terzo intento, ai progettisti viene richiesto un cambio di mentalità nel modo di pensare, agire e operare in fase di progettazione, al fine di compiere scelte nella piena consapevolezza del ciclo di vita. In questo contesto per sopperire alle mancanze esistenti in prospettiva *life cycle*, viene di seguito proposto un *assessment framework* per supportare nel cambiamento gli operatori coinvolti, ripartendo i ruoli e attivando a partire dalle prime fasi del processo edilizio un flusso di informazioni orientato alla raccolta sistematica delle informazioni LCA per realizzare un *life cycle database* di progetto in ambiente BIM.

Essendo rivolto *in primis* ai progettisti, il *framework* si focalizza esclusivamente sulle informazioni e i dati quantitativi necessari per l'elaborazione di studi LCA di edificio, mirando a ricostruire il cosiddetto *foreground system* in quanto demandato direttamente ai progettisti e con implicazioni decisive sul processo decisionale. Nello specifico, le informazioni LCA sono state rielaborate a partire da quanto espressamente richiesto a livello normativo per compiere valutazioni LCA nel settore delle costruzioni (EN 15978:2011; EPD PCR UN CPC 531:2014) e sono state in seguito esplicitate in relazione agli elementi tecnologici a cui si riferiscono. In base poi alla pratica attualmente in essere negli studi di progettazione, esplorata attraverso un approccio etnografico sul campo (Pink et al., 2013) e l'analisi di un campione rappresentativo di casi studio, sono state individuate le informazioni LCA peculiari al processo decisionale di ciascuna fase di progetto, attribuendole a seconda degli elementi tecnologici alle diverse discipline coinvolte. Il *framework* specifica così ai principali attori/progettisti le informazioni LCA di propria competenza per ogni fase di progetto, invitandoli a raccoglierle e collezionarle in modo sistematico nonché a tenerle in considerazione durante il processo decisionale. In questo modo, oltre a sviluppare progressivamente il *life cycle database* di progetto esito dei diversi contributi, esso intende promuovere in fase di progettazione scelte consapevoli dell'intero ciclo di vita, arricchendo la tradizionale pratica decisionale, basata principalmente su proprietà, caratteristiche e prestazioni tecniche dei diversi elementi, con scelte strategiche a lungo termine (declinando le informazioni *life cycle* sotto il profilo sia ambientale che economico).

Il passaggio dall'attuale pratica di progettazione alla pratica *life cycle*, supportato dal presente *assessment framework*, consiste pertanto nell'orientare l'intero processo decisionale in linea con la prospettiva *life cycle*, affidando all'intero team di progettazione l'integrazione graduale delle informazioni LCA di rispettiva competenza in ambiente BIM. In questo modo viene incoraggiata non solo una un'implementazione graduale delle informazioni LCA a partire dalle prime fasi progettuali, ma anche un crescente livello di dettaglio e accuratezza delle informazioni in quanto strettamente associate all'evoluzione del progetto. È importante però sottolineare che il *framework* è stato sviluppato per supportare la creazione di un *life cycle database*, secondo lo stadio considerato ad oggi come il più virtuoso. Nello specifico, infatti, vengono distinte per ogni fase del progetto le informazioni attualmente considerate nei progetti più complessi e ambiziosi da quelle da implementare per trasformarsi in una pratica orientata al ciclo di vita, stabilite associando alle informazioni attualmente disponibili le informazioni LCA correlate. Tuttavia, a seconda del tipo e della complessità del progetto, è possibile ridurre la gamma di informazioni LCA richieste alle differenti discipline, semplificando e snellendo il conseguente flusso di informazioni.

Nei seguenti paragrafi viene illustrato il flusso di informazioni definito dal *framework* per la raccolta di informazioni LCA al fine di creare un *life cycle database* di progetto. In particolare, in base ai requisiti e al livello di dettaglio caratteristico per ogni fase del processo, vengono

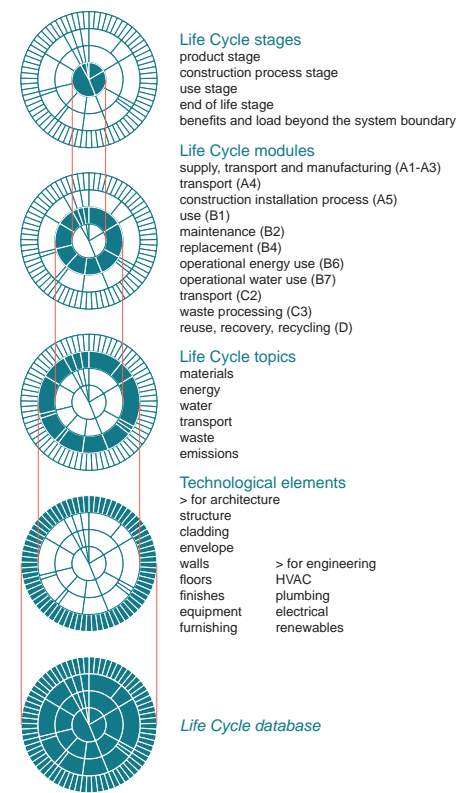


Figura 3.2.3 Struttura delle informazioni LCA nel *life cycle database* di progetto.

specificati i principali attori coinvolti e le relative informazioni LCA di competenza, mostrando così come il *database* si arricchisce e definisce con l'avanzare del progetto.

Fase di concept

Per passare dalla pratica odierna alla pratica *life cycle*, è necessario un cambio drastico di mentalità a partire dalle prime fasi progettuali, in quanto cruciali per la definizione degli obiettivi da perseguire durante l'intero processo. In quest'ottica, risulta strategica l'esplicitazione degli obiettivi di sostenibilità in linea con il quadro di raccolta delle informazioni LCA definito dal *framework*, per incoraggiare i progettisti a confrontarsi regolarmente con i dati richiesti, inserirli in ambiente BIM, nonché a monitorarli e verificarli durante il processo. Essi dovrebbero quindi integrare agli obiettivi tradizionalmente inclusi (es. consumo di energia e uso d'acqua) quelli pertinenti a tutte le fasi del ciclo di vita (es. materiali con contenuto di riciclato e rifiuti da costruzione), prendendo in prima istanza come riferimento le soglie stabilite dai criteri di certificazione ambientale e dai requisiti normativi. Per quanto riguarda il flusso di informazioni, dato lo stadio preliminare di progetto, vengono coinvolti sia un numero limitato di attori che di informazioni LCA. In particolare, le informazioni da includere nel processo decisionale sono la superficie dell'involucro, attribuita agli architetti, e i principali consumi energetici dell'edificio, quali quelli per il riscaldamento, raffreddamento e illuminazione, di competenza degli esperti del settore energetico. In questo modo, i progettisti sono indotti a considerare tali aspetti ad esempio nella selezione della soluzione volumetrica proposta rispetto alla serie di alternative progettuali elaborate. Da notare inoltre che dato che la raccolta delle informazioni è concepita all'interno di un ambiente di lavoro BIM, i dati in questione possono essere calcolati automaticamente partendo dal modello virtuale dell'edificio, evitando rilavorazioni e migliorando la coerenza delle informazioni LCA raccolte all'interno del *life cycle database* di progetto.

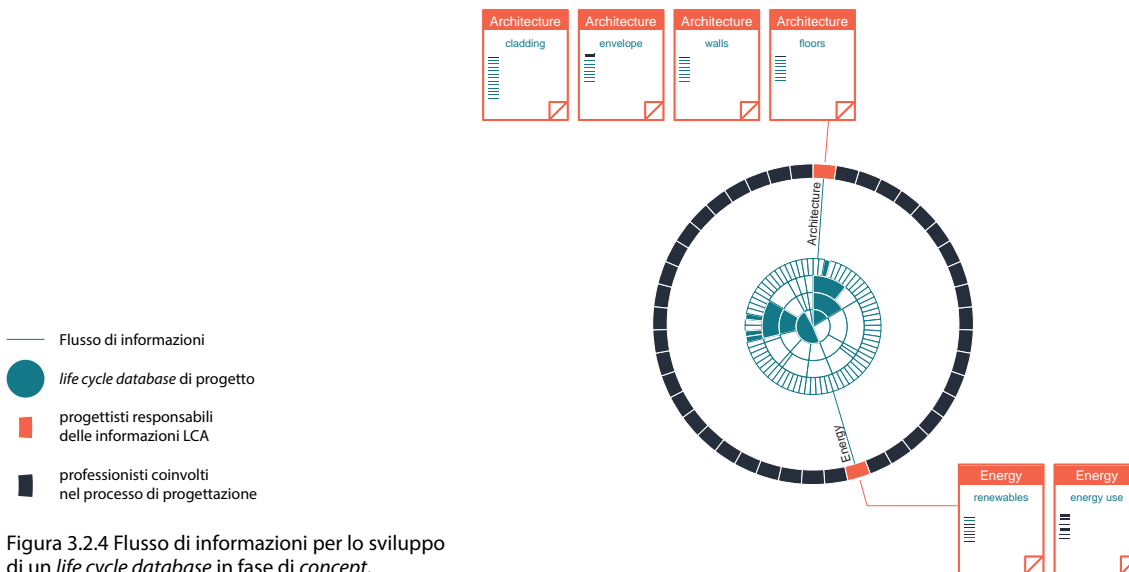


Figura 3.2.4 Flusso di informazioni per lo sviluppo di un *life cycle database* in fase di concept.

Fase preliminare

In accordo con quanto previsto dal *framework*, durante la fase preliminare il *life cycle database* viene integrato da tutte le principali competenze coinvolte con una serie di informazioni LCA riferite ai principali elementi tecnologici. Infatti, in questa fase il team di progetto sviluppa il *concept* approvato, valutando diverse opzioni spaziali e tecnologiche al fine di individuare le soluzioni ottimali, affiancando alla gamma di criteri comunemente adoperati quelli attinenti al ciclo di vita.

Nello specifico, l'implementazione delle informazioni LCA viene richiesta agli ingegneri meccanici, elettrici ed esperti in energia in termini di specifiche tecniche rispetto ai processi di manutenzione e sostituzione degli impianti proposti, rispettivamente HVAC, elettrici e sistemi di energia rinnovabile. Invece, dato che in questa fase le decisioni architettoniche riguardano principalmente gli aspetti estetici e funzionali, gli architetti sono responsabili dell'integrazione delle informazioni LCA relative esclusivamente alle distanze di trasporto dei materiali di rivestimento. Tali distanze devono essere considerate anche dagli ingegneri strutturali durante la selezione dei materiali strutturali dell'edificio. Inoltre, dalla combinazione delle soluzioni architettoniche ed ingegneristiche, gli esperti in energia sono portati a stimare il consumo di energia per i principali sistemi impiantistici, nonché quelli prodotti dalle energie rinnovabili, esplicitandone le emissioni associate. Allo stesso tempo, gli esperti in sostenibilità sono chiamati a quantificare i consumi d'acqua per il sistema idrico-sanitario e di irrigazione. Infine, dal momento che il processo di progettazione si prevede in ambiente BIM, tutte le soluzioni tecnologiche vengono opportunamente esplicitate in termini di area, volume, numero di elementi o sviluppo lineare, organizzando sistematicamente le informazioni quantitative relative sia ai sistemi impiantistici che ai materiali da costruzione.

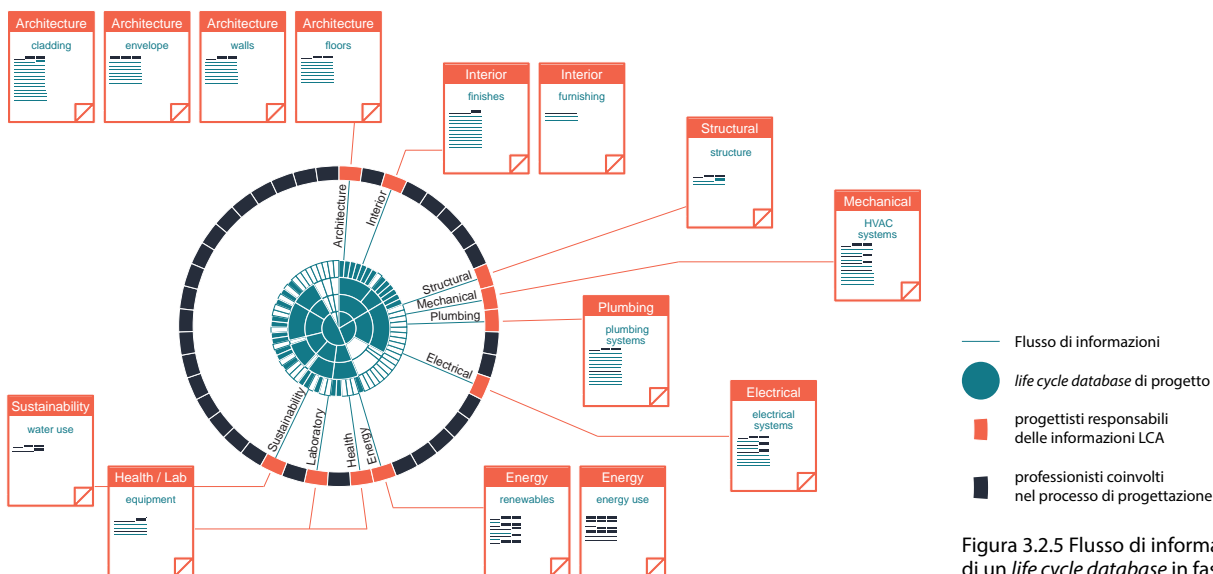


Figura 3.2.5 Flusso di informazioni per lo sviluppo di un *life cycle database* in fase preliminare.

Fase definitiva

Dal momento che la fase definitiva intende scendere a un livello di maggior dettaglio rispetto a tutti gli aspetti del progetto, le informazioni LCA ambite dal *framework* assumono un ruolo chiave per supportare i progettisti nella selezione delle soluzioni tecnologiche più appropriate anche in prospettiva *life cycle*, determinando allo stesso tempo con maggior accuratezza le informazioni già raccolte.

Il team di progettazione, infatti, viene sollecitato per i rispettivi ambiti di competenza ad affrontare le tematiche specifiche delle diverse fasi del ciclo di vita, raccogliendo le informazioni LCA relative ai principali componenti tecnologici. Oltre alla fase di produzione per cui è richiesta la quantificazione da parte di tutti gli attori dei materiali degli elementi previsti, la fase di costruzione deve essere considerata in termini di distanze di trasporto e quantità di rifiuti da costruzione dagli architetti per il sistema di involucro e rivestimento, e dagli ingegneri strutturali per il sistema strutturale. Inoltre, gli architetti sono invitati a stimare in base all'esperienza o a dati di letteratura, i consumi di energia utilizzata per l'installazione dei prodotti da costruzione e l'uso d'acqua adoperata per la produzione in loco, con ripercussioni dirette sulle scelte relative a soluzioni tecnologiche ad umido/secco e/o prefabbricate. Per quanto riguarda la fase d'uso, gli architetti e gli architetti di interni devono includere rispettivamente le emissioni VOC dei materiali di rivestimento e finitura, nonché i materiali necessari per le operazioni di manutenzione e sostituzione e le relative distanze di trasporto. Queste ultime devono essere aggiornate e/o completate da chi di competenza anche per i sistemi HVAC, elettrici e di energia rinnovabile. Inoltre, sulla base delle più recenti soluzioni progettuali, gli esperti in energia sono invitati a ricalcolare il consumo energetico dell'edificio, considerando in dettaglio le quote parti previste per tutti i sistemi impiantistici: riscaldamento, condizionamento, ventilazione, fornitura di acqua calda, illuminazione, pompe e dispositivi ausiliari e apparecchiature varie, compresa la produzione da fonti rinnovabili. Allo stesso modo, gli esperti in sostenibilità sono indotti a ristimare i consumi d'acqua dell'edificio, dettagliando progressivamente i dati e la completezza del *life cycle database* di progetto.

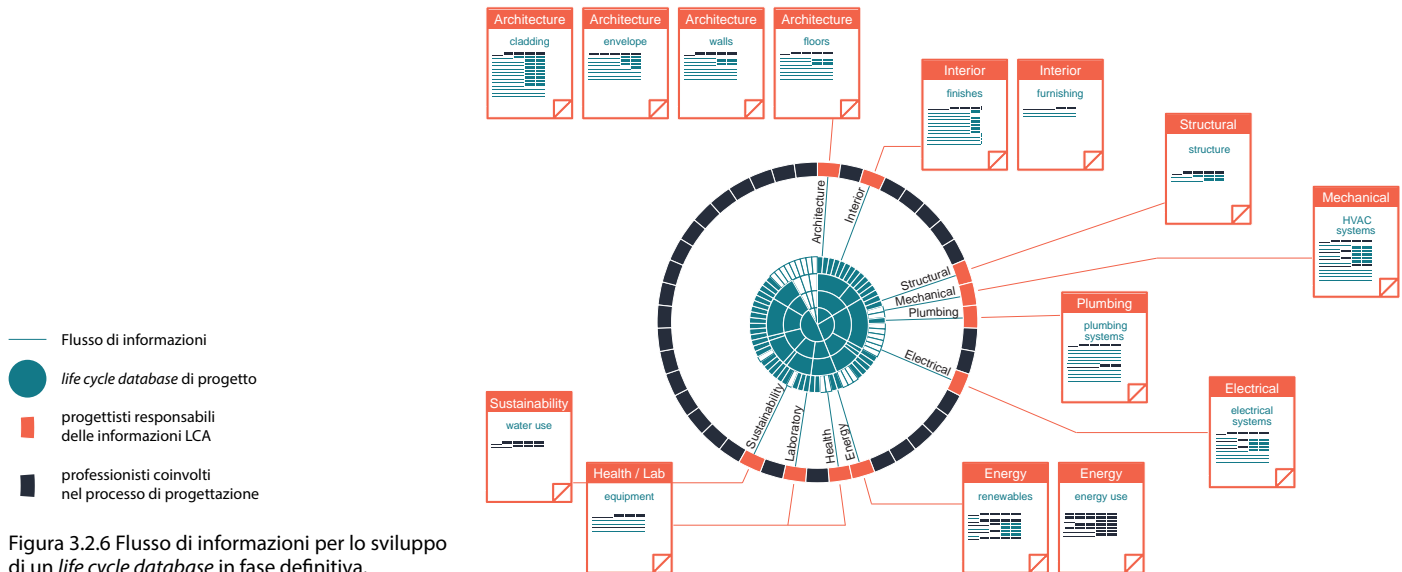


Figura 3.2.6 Flusso di informazioni per lo sviluppo di un *life cycle database* in fase definitiva.

Fase esecutiva

Nella fase esecutiva il team di progettazione individua tutti i prodotti/componenti/sistemi specifici, completando nella sua interezza le informazioni LCA presenti nel *database* in modo tale da convertirle successivamente nel set di specifiche tecniche da essere chiaramente comunicate al contraente per la fase di appalto.

A tal fine, tutti i dati e informazioni LCA precedentemente immessi vengono verificati e aggiornati sia in relazione allo sviluppo del progetto che alle fonti dei dati, preferendo dati primari piuttosto che dati da letteratura o database. Inoltre, rispetto alla fase precedente, vengono ulteriormente ampliate le tematiche in esame relative al ciclo di vita, nonché le informazioni LCA richieste e gli elementi tecnologici in esame. Le distanze di trasporto, per esempio, vengono richieste non solo per gli elementi strutturali, di rivestimento e di involucro, ma anche per le partizioni orizzontali e verticali, le finiture, l'arredamento e per tutti i sistemi impiantistici, interessando tutte le competenze di riferimento. Allo stesso modo, gli elementi tecnologici considerati per la stima dei rifiuti da costruzione vengono estesi a pareti, pavimenti e finiture, coinvolgendo gli architetti e gli architetti d'interni che, tramite la collaborazione con gli esperti di salute/laboratori, sono incaricati di fornire informazioni sulle emissioni VOC degli elementi assegnati. Inoltre, i materiali e le distanze di trasporto necessari per i processi di manutenzione e sostituzione devono essere esplicitati sia per i sistemi architettonici che ingegneristici, sollecitando simultaneamente l'esperto in energia a finalizzare il consumo in fase d'uso con il supporto dell'ingegnere meccanico. Per quanto riguarda il consumo previsto di acqua, deve essere specificato come segue: dagli esperti di sostenibilità per i sistemi di irrigazione e idrico-sanitari, dagli ingegneri idraulici per l'acqua calda sanitaria e i sistemi ausiliari, dagli ingegneri meccanici per gli impianti HVAC e dagli esperti di salute/laboratori per le principali apparecchiature. Inoltre, le informazioni relative al fine vita devono essere implementate per tutti i materiali da costruzione e i sistemi impiantistici, sollecitando le rispettive discipline a includere nel processo decisionale aspetti quali, i rifiuti da demolizione/decostruzione, il trasporto in discarica e i potenziali materiali per il riutilizzo, riciclaggio e recupero di energia.

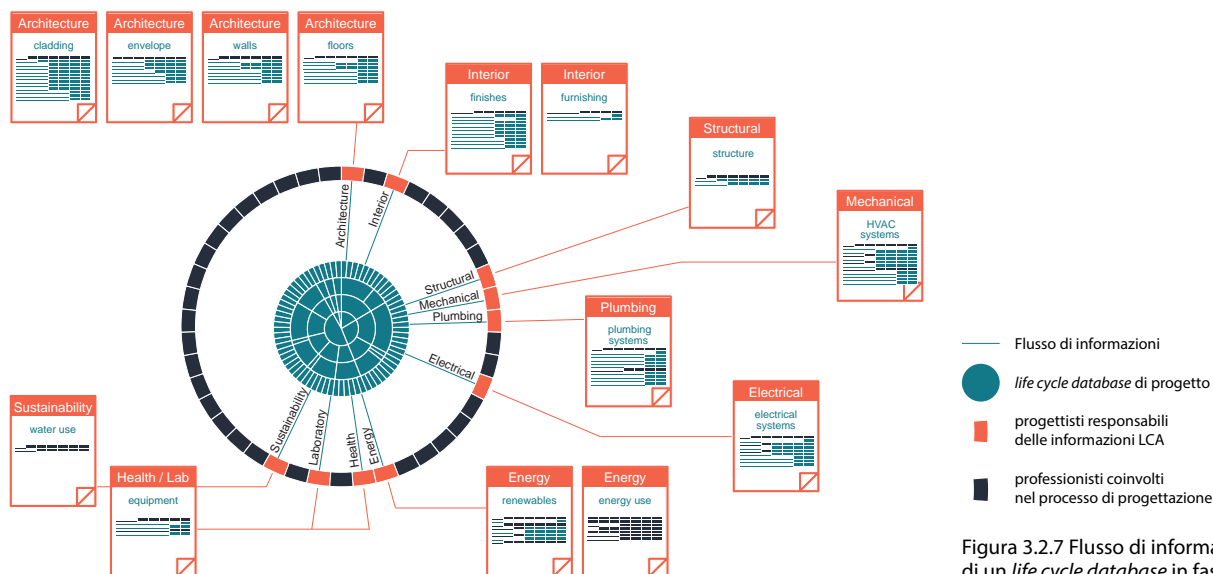


Figura 3.2.7 Flusso di informazioni per lo sviluppo di un *life cycle database* in fase esecutiva.

3.2.4 Applicazione dalla fase di progettazione al processo edilizio

Il team di progettazione, seguendo le indicazioni fornite dal *framework* proposto e applicandolo come programma di lavoro in ciascuna fase di progettazione, anticipa adottando un approccio a lungo termine numerose questioni tipiche del processo edilizio, assicurando al cliente un controllo completo sul ciclo di vita dell'edificio progettato. A dimostrazione di ciò, durante il processo viene gradualmente elaborato e completato un *life cycle database* di progetto che, a seconda della complessità, può risultare più o meno dettagliato ed esauriente ed essere quindi valutato in base alla sua completezza (da qui il termine *assessment*), rappresentativa della sua visione *life cycle* più o meno spinta.

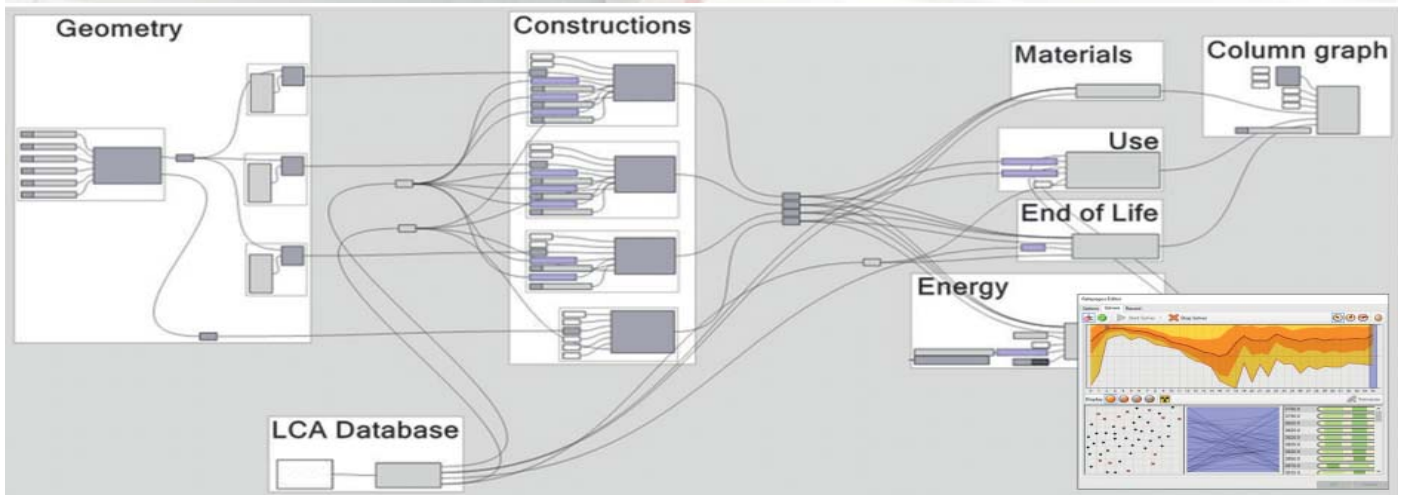
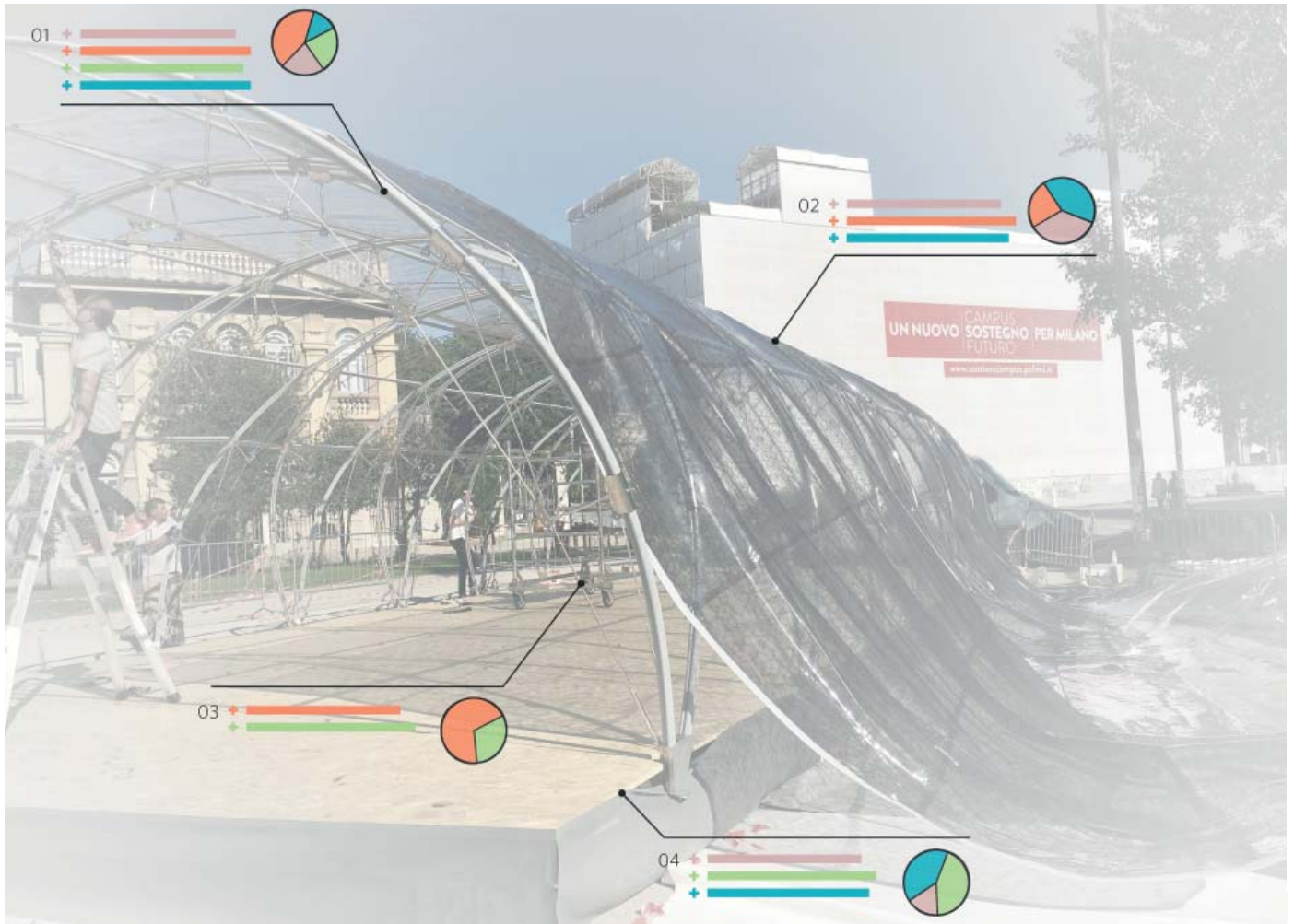
Le informazioni LCA, contenute nel *database* e diventate parte integrante del processo decisionale, non solo accrescono notevolmente l'insieme dei criteri che concorrono a indirizzare le scelte progettuali, declinandoli in prospettiva *life cycle* ma sono volti anche all'ottimizzazione degli elementi tecnologici analizzati in maniera olistica per l'intero ciclo di vita. Infatti, ciascun progettista per il proprio ambito di competenza, raccogliendo in maniera sistematica le informazioni LCA assegnate per ogni fase di progetto, è in grado di monitorare tali valori verificandone possibilmente una loro tendenza alla decrescita come espressione sintomatica della riduzione degli impatti connessi. A livello individuale, l'insieme delle informazioni LCA raccolte devono essere dunque intese dai singoli progettisti come soglie da non superare nelle fasi successive del processo, se riferite al medesimo materiale/elemento/componente di partenza. Al contrario, a livello collettivo i dati quantitativi inclusi nel *database* costituiscono l'inventario finalizzato all'elaborazione di studi LCA (ma potenzialmente anche LCC) dell'edificio progettato, svolti dai soggetti preposti o da parti terze per la modellizzazione del sistema designato e la conseguente determinazione a scala complessiva del relativo profilo ambientale (e/o economico), fornendo valori più accurati e dettagliati congiuntamente all'avanzare del processo.

In aggiunta, se il *life cycle database* realizzato in ambiente BIM viene aggiornato dagli attori coinvolti non solo durante la fase di progettazione ma in tutte le fasi del processo edilizio, verificandone man mano l'attendibilità delle informazioni comprese, si svilupperebbe notevolmente il *know-how* proprio del settore edilizio. Questo migliorerebbe non solo il bagaglio conoscitivo dei singoli attori ma rappresenterebbe soprattutto per lo studio di progettazione promotore quello che in letteratura viene chiamato *functional database*. Partendo da supposizioni teoriche ed essendo man mano validato sulla base dell'esperienza, esso conterrebbe per la pratica *life cycle* una serie di informazioni LCA da prendere come riferimento durante le fasi preliminari dei successivi progetti ed eventualmente da condividere al pubblico.

Il flusso di informazioni definito dal presente *framework* per orientare il processo decisionale e creare un *life cycle database* di progetto può essere applicato in pratica secondo due modalità. La prima su base volontaria come metodo di lavoro imposto dalla stessa struttura di progettazione per supportare lo sviluppo di pratiche orientate al ciclo di vita; la seconda su base obbligatoria, nel caso venisse prescritto da normativa o direttamente dai committenti, come parte integrante dei requisiti minimi relativi al contenuto informativo richiesto alle diverse discipline, in accordo con la matrice di responsabilità stabilita per le diverse fasi di progettazione. In entrambi i casi, la sfida è di avviare in un futuro prossimo il cambio di mentalità e quindi di processo necessario per trasformare le pratiche odierne in pratiche di progettazione *life cycle*.

Bibliografia

- Al-Ghamdi S.G., Bilec M.M., 2017. "Green Building Rating Systems and Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparative study of the existing assessment tools", *Journal of Architectural Engineering*, vol. 23 (1).
- Anand C.K., Amor B., 2017. "Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 408-416.
- Boecker J., Horst S., Keiter T., Lau A., Sheffer M., Toevs B., Reed B., 2009. *The integrative design guide to green building*, Wiley, New Jersey.
- Bueno C., Fabricio M.M., 2018. "Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM- LCA plug-in", *Automation in Construction*, vol. 90, pp. 188-200.
- Dalla Valle A., Lavagna M., Campioli A., 2018. "Matching Life Cycle Thinking and design process in a BIM-oriented working environment", *XII Italian LCA Network conference*, Messina.
- Dossche C., Boel V., De Corte W., 2017. "Use of life cycle assessments in the construction sector: critical review", *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 302-311.
- Dupuis M., April A., Lesage P., Forgues D., 2017. "Method to enable LCA analysis through each level of development of a BIM model", *Procedia Engineering*, vol. 196, pp. 857-863.
- EC-JRC, 2012. *ILCD Handbook. Towards more sustainable production and consumption for a resource efficient Europe*, European Commission – Joint Research Centre, Luxembourg.
- EPD: UN CPC 531:2014. *Product Category Rules: Buildings*.
- Jalaei F., Jrade A., 2014. "An automated BIM model to conceptually design, analyze, simulate and assess sustainable building projects", *Journal of Construction Engineering*, pp. 1-21.
- Kovacic I., Zoller V., 2015. "Building life cycle optimization tools for early design phases", *Energy*, vol. 92, pp. 409-419.
- Lu Y., Wu Z., Chang R., Li Y., 2017. "Building information modeling (BIM) for green buildings: a critical review and future directions", *Automation in Construction*, vol. 83, pp. 134-148.
- Pink S., Tutt D., Dainty A., 2013. *Ethnographic research in the construction industry*, Routledge, London and New York.
- Renz et al., 2016. *Shaping the future of construction. A breakthrough in mindset and technology*, World Economic Forum.
- Rezaei F., Bulle C., Lesage P., 2019. "Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages", *Building and Environment*, vol. 153, pp. 158-167.
- Röck M., Hollberg A., Habert G., Passer A., 2018. "LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages", *Building and Environment*, vol. 140, pp. 153-161.
- Rusu D., Popescu S., 2018. "Decision-making for enhancing building sustainability through life cycle. Applied Mathematics", *Mechanics and Engineering*, vol. 61, pp. 191-202.
- Santos R., Costa A.A., Silvestre J.D., Pyl L., 2019. "Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment", *Automation in Construction*, vol. 103, pp. 127-149.
- Soust-Verdaguer B., Llatas C., García-Martínez A., 2017. "Critical review of BIM-based LCA method to buildings", *Energy and Buildings*, vol. 136, pp. 110-120.
- Succar B., Kassem M., 2015. "Macro-BIM adoption: Conceptual structures", *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 64-79.
- EN 15978:2011. *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method*



3.3 Modello parametrico integrato con LCA: proposta per un approccio metodologico di valutazione di impatto ambientale di architetture reversibili temporanee

In linea con i principi d'integrazione della valutazione d'impatto ambientale del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment LCA*) nel processo progettuale di un'architettura, questo contributo presenta un metodo per integrare i dati per l'analisi LCA in un modello parametrico al fine di valutare e ottimizzare l'impatto ambientale di un edificio, in particolare di un'architettura a temporalità ridotta, fin dalle prime fasi della progettazione.

Le architetture temporanee, con utilizzi di breve durata, da pochi giorni a qualche mese e pochissimi anni in alcuni casi, sono caratterizzate da vincoli e requisiti specifici.

Nonostante la loro crescente diffusione generata dai cambiamenti delle esigenze sociali e funzionali di spazi costruiti, tuttavia molto spesso non utilizzano tecnologie reversibili ed eco-efficienti e prevale la pratica usa e getta, pur coinvolgendo, a volte, materiali ad alto contenuto energetico per la loro produzione e, a fine vita, presentino un'alta funzionalità residua rispetto al tempo d'uso.

Gli edifici temporanei devono inevitabilmente tenere conto di fattori quali la durata prevista, la durabilità e il ciclo di vita dei materiali, l'adattabilità e la flessibilità dei sistemi tecnologici. In questo senso, è prestata particolare attenzione ai criteri di costruibilità e alla progettazione di strategie di smontaggio per facilitare il montaggio, ma anche per assicurare la completa reversibilità degli edifici e pianificare cicli multipli di utilizzo.

L'obiettivo principale di questo contributo riguarda la messa a sistema dei requisiti progettuali (di eco-efficienza) e delle scelte architettoniche, tenendo conto della durata prevista dell'edificio, delle sue parti, al fine di ottimizzare/minimizzare fin dalle prime fasi del processo progettuale gli impatti ambientali e di scegliere consapevolmente, dal punto di vista LCA, i componenti riutilizzabili.

L'approccio metodologico adottato prevede una prima fase di analisi, in cui un modello parametrico è utilizzato per stimare e comparare gli impatti ambientali di tre sistemi costruttivi alternativi durante la fase del progetto preliminare/definitivo e guidare il progettista verso la scelta più eco-consapevole rispetto ai requisiti considerati. Nella seconda fase di analisi LCA, si utilizzano degli algoritmi genetici per definire, tra le possibili combinazioni di riutilizzo dei singoli materiali di una struttura temporanea, il numero dei cicli di vita - per ciascun componente - necessari a ridurre al minimo gli impatti ambientali complessivi rispetto allo scenario di riferimento monouso.

La metodologia proposta è stata verificata attraverso la sua applicazione a una struttura temporanea ultraleggera costruita con tecnologie reversibili, utilizzata come caso di studio.

I risultati mostrano che il metodo può supportare il progettista nella fase iniziale di progettazione, nella scelta del materiale e dell'opzione tecnologica più appropriati, tenendo conto anche dei requisiti di eco-efficienza in relazione alla variabile "tempo". Gli esiti qui raggiunti sono un primo traguardo, rilevante per la costruzione del metodo, ma ulteriori sviluppi sono necessari per rendere il metodo meno teorico, e più facilmente utilizzabile come strumento di supporto alla progettazione nella pratica architettonica.

Carol Monticelli

Professore Associato presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano, Unità di ricerca TAN (Textile Architecture Network).

E-mail: carol.monticelli@polimi.it

Alessandra Zanelli

Professore Ordinario presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano, Unità di ricerca TAN (Textile Architecture Network).

E-mail: alessandra.zanelli@polimi.it

Salvatore Viscuso

Architetto, PhD e assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano, Unità di ricerca TAN (Textile Architecture Network).

E-mail: salvatore.viscuso@polimi.it

Carlotta Mazzola

Architetto, PhD presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano, Unità di ricerca TAN (Textile Architecture Network).

E-mail: carlotta.mazzola@polimi.it

3.3.1 Introduzione

Approcci LCA integrati nel processo della progettazione architettonica

La valutazione del ciclo di vita (LCA) è una metodologia ampiamente utilizzata per valutare gli impatti ambientali di un progetto, di un edificio, di un componente o di un materiale. Da un lato si tratta di una procedura articolata e specialistica con ancora dei gradi d'incertezza (ad esempio carenti specifiche dei componenti di costruzione o dati di base, dettagli sulla fase operativa del manufatto e scenari di fine vita) che richiede l'esperienza di professionisti qualificati, dall'altro vi è una crescente domanda di introduzione di approcci LCA nella pratica dell'architettura, fin dalle prime fasi decisionali.

In particolare quando si applica durante lo sviluppo del progetto e non come strumento di valutazione ex post, la valutazione LCA, integrata ai modelli parametrici di design, consente di supportare i progettisti per valutare l'impatto ambientale di più variabili del progetto sin dalle prime fasi di progettazione e in tempo reale (Höllberg, Ruth, 2016) e quindi selezionare la scelta progettuale, materica e tecnologica, più appropriata in relazione ai requisiti e al contesto del progetto.

Di recente, l'analisi LCA quale metodologia integrata nel software CAD 3D si sta diffondendo nella pratica progettuale nell'ambito della crescente diffusione dei software interoperabili BIM (*Building Information Modelling*), i quali possono essere utilizzati nella fase di progettazione definitiva per valutare le prestazioni ambientali del progetto. Il recente sviluppo delle possibilità associative tra informazioni e modelli parametrici BIM, basati su oggetti rappresentanti parti di edifici, ha aperto numerosi scenari nell'uso della modellazione digitale. La progettazione parametrica, nelle diverse fasi del processo costruttivo, la visualizzazione di dati derivanti dal modello direttamente *on site* mediante appositi strumenti di visualizzazione, la pianificazione della fasi operative e manutentive, sono solo alcune delle potenzialità espresse dai processi BIM-based (Vanossi, Imperadori, 2013).

Con riferimento alle valutazioni BIM-based relative alla sostenibilità del progetto, Impact 2002+ (Jolliet et al., 2003) e Tally® (2019) sono due sistemi applicativi che consentono di calcolare gli impatti ambientali di materiali da costruzione alternativi direttamente in un modello Autodesk® Revit. La grande quantità di dati, necessari a costruire un modello informativo BIM con un livello di dettaglio utile a ottenere un'analisi completa dell'intero ciclo di vita dell'edificio (LOD D-E) (UNI 11337-1:2017), rende tuttavia l'interoperabilità BIM non facilmente praticabile nelle fasi iniziali di progettazione (*concept design*), e più percorribile per progetti complessi e impattanti su larga scala in cui gli standard di interoperabilità informativa BIM è richiesta e spesso obbligatoria in fase di progettazione definitiva ed esecutiva (UNI 11337-1:2017). Per la progettazione preliminare, invece, alcuni applicativi *open-source* permettono di computare delle prime valutazioni LCA direttamente in ambiente Rhino®, il quale rappresenta uno dei software di modellazione maggiormente utilizzati nella fase di *concept generation* di un progetto. Tortuga (2019), ad esempio, è un *plug-in* che permette di definire un proprio inventario LCI (*Life Cycle Inventory*) (ISO 14040:2006), associandolo a degli oggetti parametrici modellati in Rhinoceros® Grasshopper (2019) o anche in Graphisoft® Archicad, in virtù della possibilità di poter sincronizzare in tempo reale le due piattaforme software. Lo sviluppo di strumenti parametrici LCA integrati ai correnti software di progettazione consente di superare l'inserimento manuale delle quantità in oggetto, permettendo così un aggiornamento automatico dei dati durante la fase di *Design Authoring*.

Allo scopo di fornire approcci LCA integrati al design, molte ricerche propongono l'integrazione dell'analisi del ciclo di vita nei software interoperabili BIM al fine di valutare

e ottimizzare gli impatti ambientali dell'edificio. Heeren et al. (2015) hanno descritto un metodo che utilizza un modello parametrico per identificare i driver dell'impatto ambientale di un edificio residenziale sia nella fase pre-uso, con gli impatti incorporati nei materiali e nei componenti edili, che nella fase operativa e di gestione, calcolati proiettando alla vita utile dell'edificio i consumi energetici medi annui del volume costruito e i piani di rinnovamento/sostituzione dei componenti edili e tecnologici. In questo esempio, la geometria è integrata come un parametro d'input al pari di altri dati sensibili nelle analisi LCA (tipologia di materiale, *supply chain* di prodotto, durabilità ecc.) al fine di confrontare le prestazioni ambientali di due differenti opzioni tecnologiche e materiche.

I vantaggi dell'integrazione della LCA in un modello parametrico sono molteplici. Innanzitutto gli input del modello (ovvero la geometria dell'edificio, i materiali, il sistema strutturale, le condizioni al contorno) possono essere definiti parametricamente - ovvero mediante l'associazione di valori alfanumerici alle geometrie di modellazione tridimensionale - in base alla specificità di ciascun progetto, e variare in funzione degli obiettivi specifici di ciascuna fase. Ciò è necessario in quanto, nella fase iniziale di progettazione, le informazioni sono limitate e tutti i dati ambientali non sempre disponibili. Sfruttando l'aggiornamento dei modelli informativi reso possibile dall'interoperabilità BIM, è possibile eseguire una valutazione preliminare tenendo conto dei dati sui materiali generici da banca dati (in questa fase tipicamente non sono note le scelte specifiche sui materiali, e relativo produttore, o le quantità precise) e in seguito aggiornarlo, raffinarlo e dettagliarlo in relazione a una definizione più dettagliata del progetto (ad esempio, quantità, informazioni sui materiali, scelte tecniche, ecc.).

Confrontando alternativamente soluzioni progettuali differenti, le prestazioni ambientali risultanti possono essere facilmente confrontate e, eventualmente, commisurate ai costi economici di progetto mediante un'analisi AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Petrillo, 2016).

Temporaneità durevole e cicli di uso

Le architetture temporanee leggere sono sempre più comuni nell'ambito delle strutture spaziali di forma complessa, così come in eventi e manifestazioni di breve durata. Dal punto di vista progettuale, la leggerezza vuole significare sia riduzione del peso (quindi utilizzando materiali più leggeri, più o meno performanti) che limitazione gli impatti ambientali del progetto. Per questo tipo di architetture, che soddisfano requisiti specifici di progetto come la facile trasportabilità, la montabilità/reversibilità, la valutazione d'impatto ambientale può rappresentare un importante criterio di supporto decisionale per il progettista dalla fase di progettazione concettuale (Meex et al., 2018). La leggerezza è un paradigma sicuramente significativo, ma la considerazione preliminare della durata dell'architettura, e delle sue parti, e la previsione del consumo a essa associato sono ormai questioni sempre più imprescindibili: la durata, rievocando il paradigma alla base della cultura post-industriale, inteso non più come resistenza/permanenza, ma come previsione e programmazione del suo tempo di vita utile e di esercizio (Campioli, 2013). Molto spesso ci troviamo di fronte a piccole/medie architetture, progettate anche con grande contenuto tecnologico, quasi per essere permanenti, e invece usate per tempi molto brevi: pochi giorni, una settimana, poche settimane o mesi. Alla fine dell'utilizzo per cui sono state costruite, non hanno futuro e i materiali sono selezionati nei casi più virtuosi e riciclati, oppure conferiti in discarica. Nella pratica comune, infatti, i molteplici cicli di utilizzo che una struttura temporanea può eseguire non sono mai considerati, sebbene si tratti per la maggior parte di strutture reversibili e smontabili. Il concetto di "temporaneità durevole", opposto alla pratica "usa e getta",

suggerisce il riutilizzo dell'architettura temporanea e/o dei suoi componenti costruttivi dopo il primo utilizzo. In questo senso, è particolarmente rilevante eseguire una valutazione del ciclo di vita (LCA) che consideri l'intera durata di vita (quindi considerando le molteplici vite di servizio di una struttura) sin dalle prime fasi per guidare il progettista verso il materiale e la scelta tecnologica più appropriati in relazione al contesto, ai requisiti del progetto e al suo profilo ecologico (Monticelli, Zanelli, 2016). Per strutture temporanee e smontabili, la fase operativa dell'edificio durante l'uso (consumo di energia di raffreddamento/riscaldamento, manutenzione e sostituzione) ha un contributo molto inferiore rispetto alla domanda di energia incorporata nella fase di produzione, di costruzione e di fine vita (Grosso, Thiebat, 2015).

La possibilità di ri-assemblare la struttura più volte durante il ciclo di vita dell'edificio è un aspetto che dovrebbe essere preso in considerazione nella valutazione d'impatto ambientale delle strutture temporanee, per orientare il progettista verso le soluzioni materiali e tecniche più appropriate. Poiché la durata prevista e la durabilità materiale delle strutture temporanee sono spesso maggiori dell'uso effettivo della struttura, è essenziale considerare non solo gli impatti ambientali della struttura monouso nella sua breve durata, ma di molteplici cicli di utilizzo nell'intero ciclo di vita della struttura.

3.3.2. Time based Life Cycle Assessment

Uno dei temi ricorrenti che attraversano i lavori di ricerca del gruppo di ricerca TAN (Textile Architecture Network) al Politecnico di Milano è la considerazione della variabile temporale (quindi la durata delle strutture e la durabilità dei materiali) come fattore decisionale chiave, durante l'intero processo di progettazione di strutture leggere.

I metodi tradizionali di valutazione del ciclo di vita (LCA) sono utilizzati per condurre la valutazione dell'impatto ambientale degli edifici con scarsa considerazione dei fattori influenti che variano nel tempo. Poiché il ciclo di vita di un edificio è piuttosto lungo, tali dettagli influenzano significativamente l'accuratezza dei risultati della valutazione. Per colmare questa lacuna ed estendere il sistema LCA, sono riscontrabili in letteratura scientifica numerose metodologie di valutazione dinamica (*Dynamic LCA*) (Shu et al., 2017), in altre parole in grado di condurre analisi ambientali da una prospettiva dinamica, ad esempio considerando le variabili temporali lungo il ciclo di vita degli edifici, come la variazione dell'*occupancy* o la sostituzione dei componenti tecnologici (Collinge et al., 2011a; 2011b; 2014; Zhai, Williams, 2010). Il presente contributo mostra una metodologia possibile per il setup di analisi dinamiche, nelle quali l'integrazione diretta di un inventario LCI all'interno di un modello parametrico permette una loro facile applicazione in progetti in cui sia necessario considerare la variabile temporale nella valutazione degli impatti ambientali, come ad esempio nel caso di strutture temporanee e reversibili (sistemi abitativi per l'emergenza, stand fieristici, strutture per eventi sportivi o per spettacoli ecc.).

3.3.3. Metodologia: selezione dei dati e costruzione dell'algoritmo

La metodologia sviluppata incorpora un'analisi LCA semplificata in un processo di progettazione basato sulla variabile tempo (*time-based*), integrando un set di dati ambientali LCA a un modello parametrico al fine di valutare e ridurre l'impatto ambientale di una costruzione

alle varie scale del progetto. Qualsiasi modello parametrico BIM, esportato in formato IFC (*Industry Foundation Classes*) (ISO 16739:2018), è collegabile in modo dinamico con i *databases* Ecoinvent (Frischknecht, 2005), Quartz Project (2020), Ökobau (2020) – da cui ottenere i dati per un’inventario del ciclo di vita (LCI) – attraverso il *plug-in* Tortuga per Rhinoceros® Grasshopper. È possibile anche personalizzare l’inventario, ad esempio ricavando i dati dalla piattaforma software SimaPro (Pre Consultant, 2019), che utilizza il metodo di calcolo EPD 2007 (secondo ISO 21930:2017), e incorporandoli al *plug-in* mediante un foglio di calcolo in formato .csv. La metodologia proposta deve essere in grado di fornire risultati anche nelle prime fasi del progetto, quando tutte le informazioni campi non sono note. In tal caso, i dati mancanti possono essere inseriti attingendo dai dati di materiali o componenti simili inclusi nei database internazionali, per poi essere sostituiti attraverso il file .csv non appena diventano disponibili nelle fasi di progettazione definitiva ed esecutiva, ovvero quando la scelta ricade su uno specifico prodotto certificato EPD.

Oltre a garantire una continuità operativa tra le varie fasi del progetto, l’associazione delle metodologie di analisi LCA ai modelli parametrici BIM permette di operare contemporaneamente più analisi a differenti scale di lettura, in modo da poter valutare i dati ottenuti in relazione ai requisiti iniziali di un progetto. In una prima fase di analisi - *LCA di opzioni strutturali alternative*, il modello parametrico può essere utilizzato per stimare e confrontare analiticamente gli impatti ambientali di differenti sistemi di costruzione. In una fase successiva, la ricerca invece può focalizzarsi su analisi a più variabili attraverso l’uso di un risolutore di computazione evolutiva; attraverso l’utilizzo di algoritmi genetici, ad esempio, si può quantificare il numero di cicli di utilizzo necessari per ridurre al minimo l’impatto ambientale di una struttura temporanea (*ottimizzazione dell’impatto ambientale in relazione a molteplici cicli di utilizzo della struttura temporanea*), oppure ottenere il set ottimale (ovvero meno impattante) tra combinazioni differenti di materiali (*ottimizzazione dell’impatto ambientale in relazione alla scelta dei materiali*). Un algoritmo genetico è una funzione euristica utilizzata per tentare di risolvere problemi di ottimizzazione per i quali non si conoscono altri algoritmi efficienti di complessità lineare o polinomiale. In un algoritmo genetico, la funzione *fitness* permette di associare a ogni soluzione uno o più parametri legati al modo in cui quest’ultima risolve il problema considerato. La *fitness* è l’idoneità dei dati di input, detti individui, ossia la probabilità che essi vivano abbastanza da riprodursi. La selezione naturale promuove come genitori per la generazione successiva gli individui che hanno i genotipi più adatti. Sulla base del valore della funzione *fitness*, è possibile calcolare la probabilità di riproduzione dei singoli individui, corrispondenti ai dati d’input compresi nel *range* delle varianti progettuali: gli individui con valore di *fitness* più alto hanno una maggiore probabilità di essere selezionati casualmente e di partecipare alla formazione della popolazione della generazione successiva. In tal modo, l’algoritmo genetico riesce a selezionare in modo casuale gli individui più forti (elevato valore di *fitness*) e scartare quelli più deboli (basso valore di *fitness*): l’evoluzione generazionale converge quindi verso un sistema ottimizzato.

3.3.4. Applicazione del metodo al caso di un padiglione temporaneo e reversibile

La valutazione d’impatto ambientale presentata in questo contributo contempla la fase di pre-uso, dal reperimento delle materie prime allo stoccaggio, come confine del sistema; pertanto, la fase operativa e la fase di fine della vita sono al momento trascurate.

L'applicazione vede come caso studio un padiglione temporaneo con tecnologie reversibili (Figura 3.3.1). È un sistema curvo a tunnel costituito da moduli strutturali autoportanti di 2,00x7,00 m, raggiungendo un'altezza massima di 3,50 m, realizzati con archi a doppia ala progettati per essere efficienti strutturalmente ed estremamente leggeri (Mazzola et al., 2019).

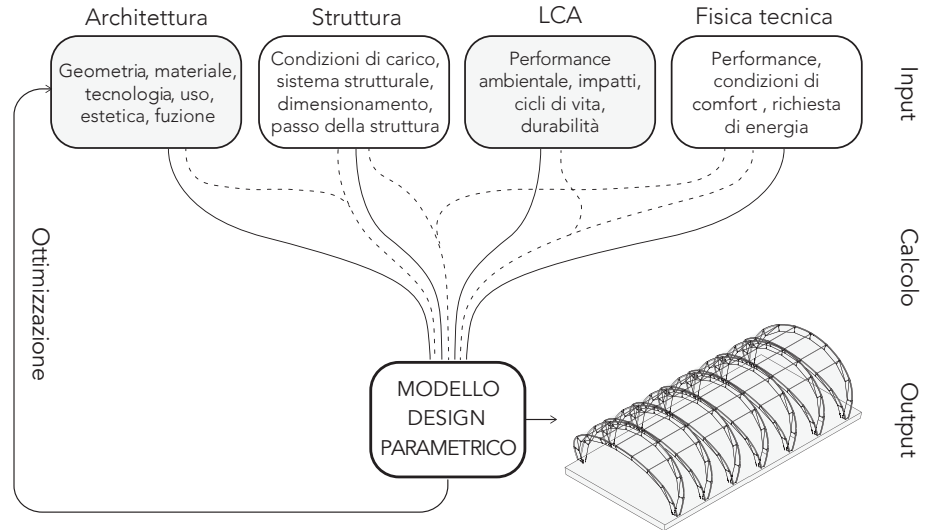


Figura 3.3.1 Flusso di lavoro schematico di un modello di progettazione parametrica che incorpora diverse specifiche di progetto (per es. architettura, analisi strutturale, LCA, aspetti della fisica dell'edificio) e interfacce (linee tratteggiate) durante il processo di progettazione. Le caselle grigie sono le analisi considerate in questo documento.

Lo studio LCA si compone di due momenti distinti e consequenziali di analisi, applicati rispettivamente alle fasi di *concept design* (progettazione preliminare) e di *detailed design* (progettazione definitiva) del padiglione.

La prima analisi intende fornire uno strumento per valutare gli impatti ambientali di diverse soluzioni di materiali contemporaneamente alla definizione della forma.

La seconda, invece, quantifica gli scenari dei possibili cicli di riutilizzo necessari per ridurre al minimo l'impatto ambientale generato dalla fase di pre-utilizzo (ovvero produzione di materiali e componenti) della struttura temporanea (o dei suoi componenti, presi singolarmente) rispetto alla soluzione monouso.

Prima analisi: LCA di tre opzioni strutturali

Tre opzioni materiche con materiali diversi e i relativi sistemi strutturali vengono confrontate per stimare il livello di impatto ambientale e quindi approfondire i vantaggi e i limiti di ciascuna soluzione. Questa valutazione preliminare dell'eco-efficienza viene poi in seguito messa a sistema con gli altri requisiti di progettazione per trovare la soluzione più efficace. La massima eco-efficienza e la minimizzazione degli impatti ambientali del progetto vogliono corrispondere, a livello progettuale, a un'ottimizzazione dei processi di produzione (riduzione dei materiali di scarto), dell'efficienza del trasporto e dello stoccaggio (in relazione al volume), della fase di montaggio e della manutenibilità in fase operativa.

Durante lo sviluppo del progetto del padiglione, si sono applicati i principi di *eco-design* sviluppati per le architetture a membrana quale metodo di valutazione preliminare delle prestazioni ambientali relative alla scelta dei materiali, nello specifico rispetto alle quantità

di materiali utilizzati, in relazione a quelle di progettazione, prima di una più specifica LCA. L'applicazione dei principi di *eco-design* consente di individuare vantaggi e svantaggi delle scelte formali, materiche (di tessuto o film e di componenti strutturali) di una struttura a membrana, e il necessario corretto sfruttamento delle potenzialità dei materiali a membrana (Monticelli, Zanelli, 2017).

Vengono quindi sviluppati i seguenti calcoli:

- calcolo del primo principio per il caso studio: $[Perimetro / Area] 47/250 = 0,19$ (valore da soddisfare $P / A \leq 0,6$);

- calcolo del secondo principio per il caso studio: $[Peso\ dell'involucro\ (W_e) / Peso\ del\ sistema\ di\ fissaggio/interfaccia\ (W_s)] 75/27 = 2,78$ (da verificare $W_e / W_s > 1$ verso valori sempre più grandi).

I valori dei due principi soddisfano i limiti definiti e ciò significa che la forma progettata e lo sviluppo del sistema di fissaggio rispetto alla dimensione del tessile di involucro per coprire la determinata area sono calibrati e ben sfruttano le caratteristiche dei materiali tessili ad esempio (ovvero di coprire grandi luci con un unico componente e ridurre quindi i punti di fissaggio e i profili di bordo).

Dopo questa verifica preliminare un'analisi LCA è stata realizzata per tre soluzioni, in cui la forma è stata mantenuta fissa e sono cambiati solo i materiali e le dimensioni dei profili strutturali. Per verificare le proprietà tecniche delle tre soluzioni strutturali con differenti materiali si è fatta una analisi tramite software Rhino e Grasshopper

Per eseguire la prima valutazione è stato utilizzato un modello strutturale lineare semplificato composto da due archi e sette montanti e sono state prese in considerazione tre variazioni di profilo strutturale e profilo parametricamente definite:

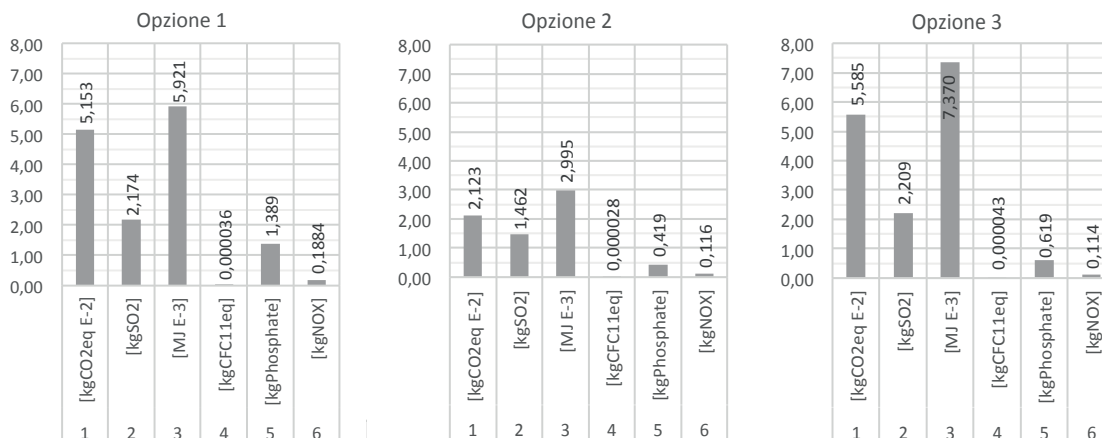
- Opzione 1. Tubi di acciaio zincato 60 mm, spessore 3 mm e puntoni 40 mm, spessore 3 mm;

- Opzione 2. Profilo di legno lamellare CLT (Cross Laminated Timber), sezione 100x150 mm e montanti con sezione trasversale 50x80 mm;

- Opzione 3. Sistema ibrido *bending active* (Liehnard, 2014) in flessione: tre tubi accoppiati con profilo in polimeri rinforzati con fibra di vetro (GFRP) 26 mm, spessore 3,5 mm combinato con cavi di tenuta in acciaio inossidabile 8 mm; puntoni: tubi GFRP accoppiati 26 mm, spessore 3,5 mm.

La geometria, che consiste nella struttura lineare degli elementi strutturali di elevazione verticale, è stata immessa utilizzando un modello CAD 3D.

Figura 3.3.2 Grafici con i risultati di impatto ambientale per ogni soluzione alternativa.



L'unità funzionale considerata nella prima analisi è un modulo autoportante composto da due archi inclinati e sette montanti.

La forma, le dimensioni e lo spessore dei profili strutturali sono stati controllati dal software di progettazione parametrica Grasshopper™ (2019). Poiché questa valutazione preliminare deve essere utilizzata in una fase iniziale di progettazione, è stato possibile trascurare tutte le inesattezze introdotte da una modellazione semplificata.

Attraverso l'algoritmo integrato in Grasshopper™ (2019) con il *plug-in* Tortuga (2019), è stata effettuata la valutazione di impatto ambientale di ciascun materiale per unità funzionale, misurata secondo i sei indicatori LCA tipicamente considerati nella Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD).

Tabella 3.3.1 Impatto ambientale delle tre alternative materiali e strutturali valutate con indicatori EPD, combinando i dati ambientali dei componenti costruttivi, ottenuti da data base LCA, con le quantità del modello geometrico.

| Id. | Categoria di impatto ambientale | U.d.m. | Opzione 1 Acciaio 137 kg | Opzione 2 CLT 195 kg | Opzione 3 GFRP 73 kg |
|-----|---------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | Global Warming Potential | kgCO ₂ eq | 515.345 | 212.255 | 558.510 |
| 2 | Acidification | kgSO ₂ | 2.174 | 1.463 | 2.210 |
| 3 | Depletion of Non-Ren. Energy | MJ | 5921.177 | 2994.661 | 7370.431 |
| 4 | Ozone Depletion Potential | kgCFC ₁₁ eq | 0.000036 | 0.000028 | 0.000043 |
| 5 | Eutrophication | kgPO ₄ | 1.389 | 0.419 | 0.619 |
| 6 | Formation Tropospheric Ozone | kgNOX | 0.188 | 0.116 | 0.114 |

In primo luogo, concentrandoci solo sui risultati dell'LCA, possiamo confermare che l'ultraleggerezza di alcune soluzioni (ovvero l'opzione 3) non corrisponde linearmente all'eco-efficienza, anche se confrontata con le soluzioni leggere (ovvero l'opzione 1) e più massicce/tradizionali (cioè opzione 2). L'opzione 2 è la soluzione più pesante in kilogrammi, ma con il profilo ecologico migliore.

Come mostra la Tabella 3.3.1, le categorie di impatto con una notevole differenza nei risultati per le tre soluzioni sono il potenziale di riscaldamento globale (GWP) e l'esaurimento delle energie non rinnovabili (MJ); anche l'impatto dell'eutrofizzazione durante la produzione della struttura in acciaio e in fibrorinforzato è maggiore rispetto alle altre due opzioni. L'opzione del legno lamellare, con un processo produttivo prefabbricato vantaggioso per l'origine naturale del materiale, ha un basso profilo di impatto ambientale.

Tuttavia le prestazioni ambientali sono uno dei criteri che dovrebbero essere messi a sistema con gli altri requisiti del progetto per scegliere la soluzione ottimale. Tale sistematizzazione può offrire uno scenario differente, influenzando la scelta di un'opzione tecnologica anche diversa da quella con le migliori prestazioni di eco-efficienza.

Nel caso specifico l'uso di materiali strutturali più leggeri e più efficienti porta a ridurre al minimo gli elementi costruttivi e, quindi, a sviluppare strutture ad alta efficienza (Otovic et al., 2016). La leggerezza dei materiali strutturali nelle strutture temporanee significa sia una più facile trasportabilità dei componenti dell'edificio (ovvero volume inferiore) che una maggior facilità di installazione (ovvero non è necessario alcun macchinario per la costruzione, è costruibile da installatori non esperti).

Come mostrato in Tabella 3.3.2, l'opzione 3 risulta ottimale rispetto ai requisiti del progetto. Tuttavia, a causa del profilo ecologico più elevato e dei prerequisiti del progetto per l'uso temporaneo (che significa facile disassemblaggio), la verifica della durabilità dei materiali e la riusabilità del sistema diventa uno dei requisiti più importanti per strutture temporanee. Quindi se la valutazione considerasse i confini del sistema allargati con la valutazione degli impatti dei trasporti e del cantiere, i risultati degli impatti ambientali di tale soluzione rispetto alle altre due potrebbero presentare un bilancio differente.

| | | OPZIONE 1 Acciaio | OPZIONE 2 CLT | OPZIONE 3 GFRP ibrido |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| PROCESSO PRODUTTIVO | Impatto ambientale | ●● | ● | ●● |
| | Rifiuti di produzione | ● | ●●● | ● |
| FASE DI TRASPORTO | Stoccaggio - volume | ●● | ●●● | ● |
| | Peso | ●● | ●●● | ● |
| PROCESSO DI MESSA IN OPERA | Necessità di attrezzature | ●● | ●●● | ● |
| | Expertise di operatori specializzati | ●● | ●● | ● |
| | Tempo di costruzione | ● | ● | ● |
| FASE D'USO | Durabilità dei materiali | ● | ● | ● |
| | Manutenibilità | ● | ●● | ● |
| SCENARIO DI FINE VITA | Riciclabilità | ● | ●● | ●●● |

Tabella 3.3.2 Check-list e verifica qualitativa dei requisiti del progetto per le tre opzioni analizzate (un punto è migliorativo, tre punti peggiorativi).

Seconda analisi: ottimizzazione dell'impatto ambientale con la considerazione di più cicli di utilizzo della struttura temporanea e reversibile

Nella seconda analisi, la struttura ultraleggera (ovvero l'opzione 3) è stata presa come riferimento per valutare il numero di cicli di utilizzo necessari per renderlo più eco-efficiente, sfruttando il più possibile il profilo ecologico iniziale, con impatti ambientali consistenti, invece di produrre nuove strutture per usi futuri, causando un ulteriore impatto ambientale. La seconda analisi è la risposta alla seguente domanda di ricerca: impostando possibili scenari di minimizzazione degli impatti ambientali totali per l'opzione ultraleggera, quanti cicli di utilizzo possono vivere i componenti rispetto allo scenario monouso?

L'unità funzionale in questo caso è ampliata all'intero padiglione temporaneo, il che significa sette moduli che sono sette volte l'unità funzionale della prima analisi.

La geometria di input è derivata da un modello 3D dettagliato sviluppato in Rhinoceros (2020), in cui gli spessori dei materiali sono indicati in modo parametrico. Attraverso il solutore evolutivo Galapagos for GrasshopperTM (2019), diverse variabili parametriche (ovvero geometria, materiali, quantità, cicli di utilizzo, ecc.) possono essere collegate alternativamente a una funzione di *fitness* dell' algoritmo genetico al fine di ottimizzare le restanti variabili, i genotipi. In questo caso, impostando l'input previsto dalla specifica applicazione ovvero del minimo impatto ambientale ottenibile, l'algoritmo ha permesso di calcolare il numero minimo di cicli di riutilizzo necessari per ridurre l'impatto dei materiali utilizzati.

La minimizzazione è stata fatta per ogni componente, successivamente combinato con gli altri, considerando i cicli di utilizzo dell'intera struttura. I risultati sono stati confrontati con lo scenario monouso.

Gli scenari valutati in quest'analisi sono: riduzione del 20%, del 40%, del 60%, del 80% e del 100% degli impatti ambientali rispetto agli impatti relativi al singolo uso. L'ipotesi degli scenari di riduzione percentuale deriva dalla similitudine degli ultimi consigli del protocollo europeo LEED v4 di ridurre gli impatti rispetto a un edificio esistente simile (ovvero riduzione del 10% degli impatti per il GWP) (Kubba, 2015).

Nella valutazione dell'impatto ambientale è stata presa in considerazione solo la fase di pre-utilizzo, come confine del sistema, e quindi la fase operativa di gestione e di fine vita dell'edificio sono state al momento trascurate. La durata di un ciclo di utilizzo è stata fissata per sei mesi: significa che il padiglione viene smontato e riutilizzato ogni 6 mesi. La massima durata funzionale del padiglione temporaneo è stata definita per cinque anni, quindi con

dieci cicli di utilizzo. La funzione fitness utilizzata in questo processo di risoluzione evolutiva è la seguente (1):

$$\text{Funzione fitness: } \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \cong 0 \text{ (asintoticamente uguale a 0)}$$

(1)

$$x_N < x_{N+1}$$

$\sigma_x = \text{Deviazione standard}$

$x_i = \text{risultati LCA per ogni categoria di impatto / Num. di cicli di riuso}$

$\bar{x} = \text{Valore di riferim. (-20\% dei risultati di impatti LCA per il caso monouso; -40\%; ...)}$

$N = \text{Categorie di impatto (popolazione)}$

La funzione misura lo scarto quadratico medio dei valori relativi agli impatti ottenuti dai dati di riferimento (-20%, -40%, ...), al variare dei genotipi, ovvero le restanti variabili definite al principio dell'analisi.

I dati riguardanti il numero di cicli di riutilizzo) rappresentano i genotipi che, per ciascun componente, popolano un dominio definito a priori (1-10 cicli) e che, nel generare il valore di deviazione standard asintoticamente più vicino a zero, garantiscono una riduzione degli impatti ambientali per la percentuale richiesta.

I risultati indicano che lo scenario -20% di riduzione degli impatti ambientali è soddisfatto dal riutilizzo di appena due componenti dell'edificio (ovvero le travi GFRP e il pavimento in OSB), rispettivamente per due e quattro cicli di utilizzo. Quando la riduzione è del -40%, tutti i componenti andranno riutilizzati per un secondo ciclo, tranne i tubi in GRFP e i connettori in acciaio inox, che dovranno essere riutilizzati per più cicli. Lo stesso vale per il resto degli scenari di riduzione.

Pur rappresentando degli scenari puramente ipotetici, lo studio fornisce importanti indicazioni per le strategie di riutilizzo dei componenti della struttura temporanea oggetto

Tabella 3.3.3 Risultati LCA monouso del padiglione temporaneo, analizzati per componente e impatto totale.

| Cat. di impatto | U.d.M. | Basamento | | Struttura | | Involucro | | Totale (uso singolo) |
|------------------------------|--------------------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | Travi GFRP | Pannelli OSB | Tubi GFRP | Cavi acciaio inox | Giunti acciaio inox | Telo PVC Crystal | |
| Global Warming Potential | [kgCO ₂ eq] | 5840.275 | 13.659 | 3607.223 | 817.695 | 1210.690 | 4623.434 | 16112.976 |
| Acidification | [kgSO ₂] | 20.713 | 0.094 | 12.793 | 4.569 | 7.026 | 13.951 | 59.144 |
| Depletion of Non-Ren. Energy | [MJ] | 81495.994 | 192.708 | 5033.688 | 8275.34 | 12823.948 | 112883.845 | 266007.520 |
| Ozone Depletion Potential | [kgCFC ₁₁ eq] | 0.000486 | 1.7705e-6 | 0.000300 | 0.000044 | 0.000064 | 0.000060 | 0.000956 |
| Eutrophication | [kgPO ₄] | 5.612 | 0.027 | 3.467 | 1.389 | 2.167 | 1.762 | 14.424 |
| Formation Tropospheric Ozone | [kgNOX] | 0.981 | 0.0075 | 0.605 | 0.283 | 0.416 | 39.810 | 42.102 |

| Component | Materiali | Cicli di riuso (1 ciclo = 6 mesi; 10 cicli max) | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | -20% rispetto al monouso | -40% rispetto al monouso | -60% rispetto al monouso | -80% rispetto al monouso | -100% rispetto al monouso |
| Basamento | Travi GFRP | 2 | 2 | 5 | 8 | 10 |
| Pavimento | Pannelli OSB | 4 | 5 | 3 | 2 | 8 |
| Archi | Tubi GFRP | 1 | 2 | 2 | 9 | 10 |
| Sistema di irrigidimento | Cavi acciaio inox | 1 | 1 | 5 | 6 | 10 |
| Connettori | Giunti acciaio inox | 1 | 3 | 7 | 2 | 10 |
| Involucro | Telo PVC Crystal | 1 | 2 | 2 | 3 | 10 |
| GWP [kgCO₂eq] | | 12890.382635 | 3222.610086 | 6445.192183 | 9967.783901 | 1611.573352 |
| σ_x | | 0.002195 | 0.001429 | 0.001963 | 0.014976 | 1611.573352 |

di analisi, ottimizzandole al fine di ridurre gli impatti complessivi secondo una percentuale definita a priori.

Tabella 3.3.4 Numero dei cicli di riutilizzo dei componenti del padiglione e deviazione standard da cinque target di riferimento (-20%, -40%, -60%, -80% e -100% di impatto GWP rispetto al monouso).

3.3.5 Conclusione

La metodologia presentata è stata calibrata e ottimizzata per la valutazione dell'impatto ambientale delle strutture temporanee, integrando i dati degli impatti ambientali LCA di materiali e componenti in un modello parametrico. In questa fase, lo sviluppo del metodo è ancora in essere. L'obiettivo della ricerca è di procedere con successive indagini al fine di fornire uno strumento utile per supportare il progettista sin dalle prime fasi di progettazione per valutare le opzioni di progettazione eco-efficienti considerando l'intero ciclo di vita del progetto e la variabile "tempo". Alcuni paradigmi rilevanti, che derivano anche da altre indagini, sono ricorrenti nell'interpretazione dei risultati dell'analisi: nell'analisi ambientale, il contesto funzionale e i requisiti specifici di ciascun progetto devono essere sistematizzati con i risultati della valutazione LCA per una migliore scelta tecnologica; se il progetto ha una natura temporanea, fondamentale è la considerazione della durata prevista e dei cicli di utilizzo dalla fase di progettazione.

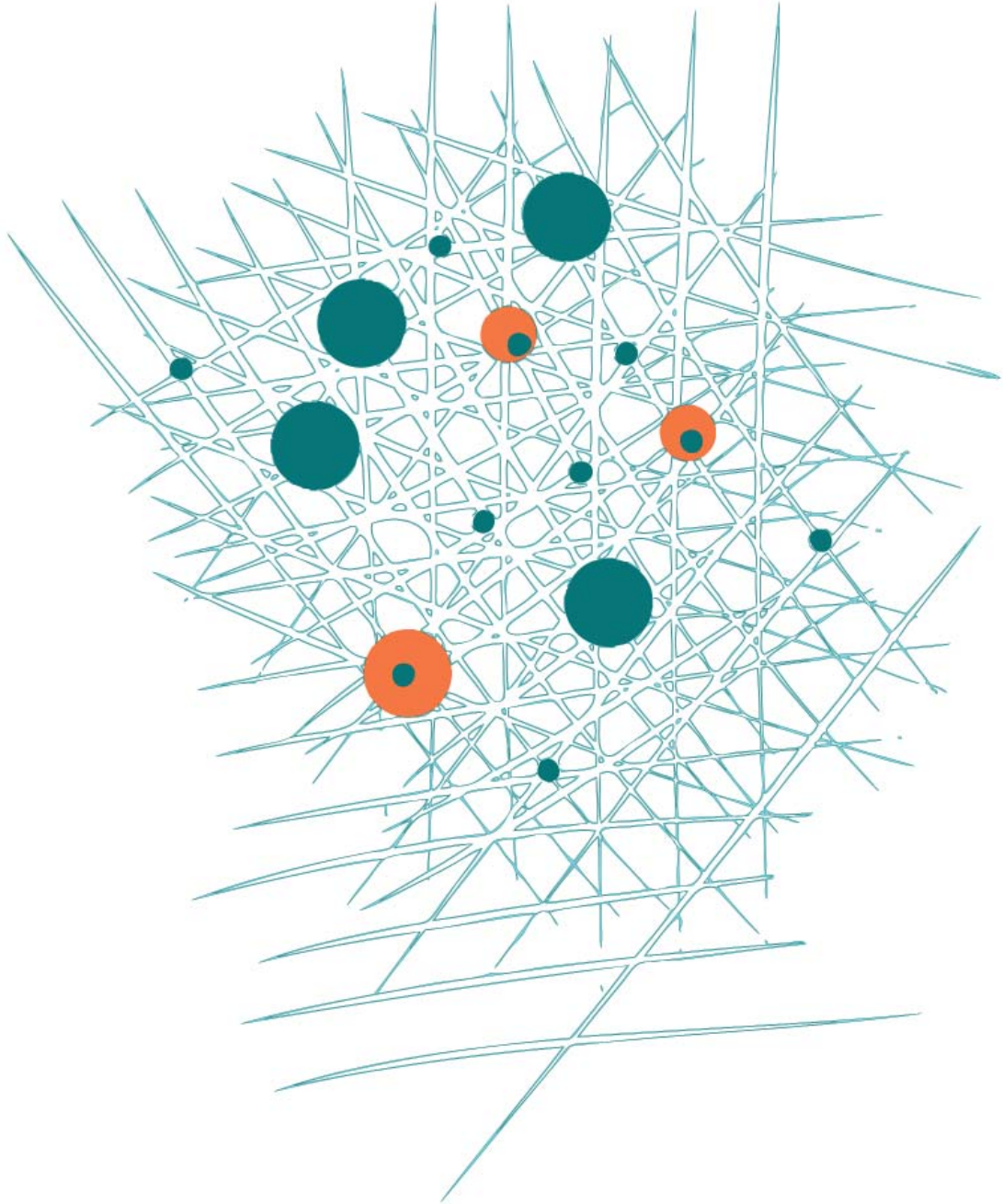
Quanto emerge da questa analisi è un'indicazione anche sui possibili cicli che un componente può/deve effettuare nell'arco della vita utile, al fine di ottimizzare gli impatti ambientali per la sua produzione, soprattutto in casi in cui l'uso è limitato nel tempo a dispetto di funzionalità intrinseche molto più longeve. Lo studio mostra un calcolo algoritmico applicabile in organismi edilizi componibili per parti d'opera indipendenti tra loro, in modo da valutare la strategie di riutilizzo ottimale per ciascun componente, con l'obiettivo di minimizzare gli impatti complessivi della architettura in oggetto.

Gli ulteriori sviluppi della ricerca vertono sul perfezionamento della metodologia, prendendo in considerazione altre variabili e integrandole nel modello di progettazione parametrica. Infatti significativo è il considerare nei confini del sistema di analisi anche la fase di cantiere e la fase di fine vita.

Bibliografia

- Campioli A., 2013. *Prefazione*, in Monticelli C., *Life cycle design in Architettura*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna, pp. I-III.
- Collinge W., Landis A., Jones A., Schaefer L., Bilec M., 2014. "Productivity metrics in dynamic LCA for whole buildings: Using a post-occupancy evaluation of energy and indoor environmental quality tradeoffs", *Building and Environment*, vol. 82, pp. 339-348.
- Collinge W., Xu H., Saunders C., Bilec M., Landis A., Jones A., Schaefer L., 2011b. "Enabling dynamic life cycle assessment of buildings with wireless sensor networks", in *International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, Institute for Electrical and Electronics Engineers: Chicago, IL.
- Collinge W., Bilec M., Landis A., Jones A., Schaefer L., 2011a. "Scenario Modeling for Dynamic Life Cycle Assessment of Commercial and Institutional Buildings", in *Life Cycle Assessment XI*, American Center for Life Cycle Assessment: Chicago, IL.
- Frischknecht R. et alii, 2005. "The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10(1), pp. 3-9.
- Grasshopper™, 2019. <https://www.grasshopper3d.com>.
- Grosso M., Thiebat F., 2015. "Life cycle environmental assessment of temporary building constructions", *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3180-3185.
- Heeren N., Mutel C. L., Steubing B., Ostermeyer Y., Wallbaum H. and Hellweg S., 2015. "Environmental Impact of Buildings: What Matters?", *Environmental science & technology*, vol. 49(16), pp. 9832-98.
- Höllberg A., Ruth J., 2016. "LCA in architectural design—a parametric approach.", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21(7), pp. 943-960.
- ISO 14040:2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- ISO 21930:2017. *Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works — Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services*.
- ISO 16739:2018. *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*.
- Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., 2003. "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8(6), pp. 324-330.
- Kubba S., 2015. *LEED v4 Practices, Certification, and Accreditation Handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Lienhard J., 2014. *Bending-active structures: Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein*. ITKE, University of Stuttgart.
- Mazzola C., Stimpfle B., Zanelli A., Canobbio R., 2019. "TemporActive Pavillion: first loop of design and prototyping of an ultra-lightweight temporary architecture", *Proceedings of the TensiNet Symposium 2019 "Softening the Habitats"*, Politecnico di Milano, pp. 390-401).
- Meex E., Höllberg A., Knapen E., Hildebrand L., Verbeeck G., 2018. "Requirements for applying

- LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design", *Building and Environment*, vol. 133, pp. 228-236.
- Monticelli C., Zanelli A., 2016. "Life Cycle Design and efficiency principles for membrane architecture: towards a new set of eco-design strategies", *Procedia Engineering*, vol. 155, pp. 416-425.
- Monticelli C., Zanelli A., 2017. "Application and validation of eco-efficiency principles to assess the design of lightweight structures: case studies of ETFE building skins", *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 "Interfaces: architecture. engineering. science"*, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 25-28 September, Hamburg, Germany, pp. 1-10.
- Okobau, 2020. <https://www.oekobaudat.de/en.html>
- Otovic A. P., Jensen L. M., Negendahl K., 2016. *Expansion in number of parameters-simulation of energy and indoor climate in combination with LCA*, ASHRAE Annual Conference.
- Petrillo A., De Felice F., Jannelli E., Autorino C., Minutillo M., Lavadera A., 2016. "Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system", *Renewable Energy*, vol. 95(C), pp. 337-355.
- Pre Consultant, 2019. Sima Pro 8, <https://simapro.com/global-partner-network/pre-consultants/>.
- Quartz Project, 2020. <http://quartzproject.org/q>
- Rhinoceros, 2020. <https://www.rhino3d.com/it/>
- Shu S., Xiaodong L., Yimin Z., Borong L., 2017. "Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings", *Energy and Buildings*, vol. 149, pp. 310-320.
- Tally®, 2019. A joint development project from KT Innovations, thinkstep, and Autodesk, ©2019 KT Innovations, <https://www.choosetally.com>.
- Tortuga, 2019. *LCA in Grasshopper*, <https://www.food4rhino.com/app/tortuga-lca-grasshopper>.
- UNI 11337-1:2017. *Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi*.
- Vanossi A., Imperadori M., 2013. "BIM and optioneering in dry technology small scale buildings", in: *ICT. Automation and the Industry of the Built Environment*, Maggioli, pp.53-55.
- Zhai P., Williams E.D., 2010. "Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems", *Environmental Science and Technology*, vol. 44(20), pp. 7950-7955.



The shape and solutions of the future rely totally
on the collective effort of people working together.

Jacque Fresco

3.4 Approccio Life Cycle nell'ambito della progettazione e produzione delle facciate adattive. Sfide, criticità e soluzioni nel settore edilizio italiano

La ricerca parte dallo studio delle facciate adattive caratterizzate dalla potenzialità di assicurare il comfort ambientale negli spazi interni degli edifici e allo stesso tempo di ridurre il consumo energetico per il condizionamento e l'illuminazione. Le tecnologie applicate a questo tipo di facciate, basandosi sull'estrema flessibilità dei cambiamenti dello stato dell'involucro in termini di brevi intervalli di tempo, rappresentano un ambito innovativo di ricerca nel campo della sostenibilità lungo l'arco dell'intero ciclo di vita degli edifici. Lo studio ha l'obiettivo di individuare, attraverso un sondaggio *on-line*, necessità e sfide degli *stakeholders* coinvolti nel processo di progettazione e realizzazione di involucri adattivi, con il duplice scopo di approfondire le criticità e gli obiettivi del mercato evidenziati e allo stesso tempo di consentire l'implementazione di uno strumento metodologico/progettuale, di tipo sistemico e basato sul ciclo di vita, rappresentato da una mappatura dei principali parametri che caratterizzano la valutazione del ciclo di vita delle facciate adattive. I risultati di questo studio forniscono una visione d'insieme incentrata sulla necessità di risolvere le lacune esistenti nel campo dell'applicazione della valutazione del ciclo di vita degli edifici e dei sistemi di facciata con la finalità comune di aggiungere qualità e competitività al processo produttivo nel settore delle costruzioni.

3.4.1 Introduzione

Nell'ultimo decennio la Commissione Europea ha svolto azioni e intrapreso iniziative per lo sviluppo sostenibile in ambito intersettoriale e in particolare nel mercato delle costruzioni, con l'obiettivo di trasformare l'economia, al fine di generare nuovi vantaggi competitivi per le imprese e sostenere la decarbonizzazione (UNEP 2011, *Towards a Green Economy*). Nel 2015 ha promosso un Piano di Azione per dare impulso alla diffusione dell'economia circolare, con l'intento di prolungare, lungo l'intero ciclo di vita, il valore dei prodotti, dei materiali e delle risorse, minimizzando al contempo la produzione di rifiuti (COM/2015/614 *final*). Simultaneamente, con la Comunicazione COM/2014/445 *final* ha suggerito strategie per l'efficienza nell'uso delle risorse nell'edilizia, in particolare promuovendo una "progettazione migliore dell'edificio" che calibri l'uso delle risorse rispetto alle esigenze funzionali e prestazionali, tenendo in conto prodotti per la costruzione più efficienti dal punto di vista del riuso e del riciclo e attività di cantiere che riducano gli impatti ambientali, nonché prevedendo scenari di demolizione selettiva (EU Commission 2015, EU Commission 2014). Un aspetto rilevante di tali iniziative è quello di agire in sinergia con le Direttive sulla prestazione energetica nell'edilizia, circoscritte alla sola fase operativa del ciclo di vita dell'edificio, e che hanno come obiettivo primario il riuso degli edifici, mediante strategie di mantenimento delle strutture esistenti e la trasformazione del sistema involucro/impianti ad energia quasi zero. L'ultima Direttiva in tal senso è la 2018/844 EPBD, che implementa le Direttive

Manuela Crespi

Ricamatore di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'Architettura dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza.

E-mail: manuela.crespi@uniroma1.it

Alessandra Battisti

Professore Ordinario di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'Architettura dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza.

E-mail: alessandra.battisti@uniroma1.it

Sandra G.L. Persiani

Architetto, PhD, assegnista di ricerca presso il Department of Architecture, Technical University of Munich, Germany.

2010/31/UE e 2012/27/UE, e che introduce un'ulteriore sfida al mercato delle costruzioni indirizzata a predisporre gli edifici all'intelligenza, attraverso tecnologie dell'informazione e della comunicazione e sistemi elettronici allo scopo di adeguarne il funzionamento alle esigenze degli occupanti e migliorare l'efficienza energetica e le prestazioni complessive (Direttiva 2018/844/UE).

In questo panorama di politiche, che richiedono edifici a basso impatto ambientale, nelle diverse fasi del ciclo di vita, e che facilitano la realizzazione di involucri adattivi, la tabella di marcia dell'Unione Europea si scontra con la realtà del mercato delle costruzioni che, pur condividendo gli stessi obiettivi, fatica ad adeguarsi con la rapidità richiesta¹.

Alla ricerca di soluzioni, risulta decisiva l'introduzione della metodologia del *Building Information Modelling* (BIM), intesa come piattaforma per la pianificazione e la progettazione integrata e condivisa, che fornisce una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali, lungo l'arco del ciclo di vita di ciascun oggetto costituente l'edificio (Volk, 2014; Poljanšek, 2017). Infatti, benché gli esempi di integrazione di strumenti BIM ed LCA siano limitate a poche *plug-in* (Oneclick, Tally), sono molti gli studi riguardanti l'interoperabilità tra l'ambiente BIM e le valutazioni LCA che invitano, ad esempio, ad implementare la quantità e la qualità dei dati ambientali tra le proprietà parametriche dei materiali (Soust, 2016; Bueno, 2018).

L'approccio parametrico per la definizione degli oggetti BIM può essere utile a sviluppare una metodologia che sia di facile comprensione e applicabile da chi non abbia approfondite conoscenze né esperienze in valutazione LCA nelle fasi iniziali della progettazione, ma soprattutto per implementare l'elaborazione di metodi di ottimizzazione dei dati, sia in forma automatizzata che manuale (Hollberg, 2016). In Italia il Politecnico di Bari ha sviluppato una matrice di flusso di informazioni per la ricerca dei parametri BIM che influiscono sul calcolo degli impatti ambientali denominata *Architecture of Variables* (AoV). (Pierucci, 2015; Cavalliere, 2018). Inoltre, l'enorme quantità di dati elaborati nei diversi studi condotti attraverso metodi di ottimizzazione di tipo computazionale ha portato nuovamente a interrogarsi sulla loro efficacia, all'interno del processo iterativo che sottende alle scelte progettuali, e a considerare anche l'importanza di una forma di visualizzazione dei dati che sia utile al progettista stesso (Basbagill, 2017; Jusselme, 2017).

¹ In due recenti studi del 2019 condotti dal Green Building Council Italia circa lo stato dell'arte rispettivamente sulla diffusione dell'economia circolare e sull'uso della valutazione del ciclo di vita nel settore edilizio sono emerse diverse criticità in merito (GBC Italia 2019/1, GBC Italia 2019/2). Sono assenti metodologie di valutazione semplificate di tipo *Life Cycle* degli impatti ambientali, in relazione alle diverse fasi del progetto ed alla conseguente mancata disponibilità di dati di partenza sui materiali da utilizzare; le valutazioni LCA sono, infatti, rare nelle prime fasi dell'attività progettuale poiché le scelte costruttive sono spesso rimandate alla fase esecutiva, durante la quale sono effettuate delle mere valutazioni comparative di prodotti già esistenti (Crespi, 2017). Inoltre, i software per l'elaborazione di LCA presentano svantaggi distinti, dovuti nel caso di software dedicati, alla loro complessità in termini di conoscenze di base per il loro utilizzo e, nel caso di software *user-friendly*, alla scarsa attendibilità ed alla mancata trasparenza dei risultati finali.

Mappatura LCA delle facciate adattive

In questo contesto della ricerca sulle metodologie di integrazione tra BIM ed LCA, la computazione digitale svolge un ruolo fondamentale nell'efficiente esplorazione delle soluzioni progettuali per la possibilità di concentrare in un unico *workflow* la generazione formale, la simulazione di fenomeni statici e dinamici ed i processi di fabbricazione.

Il BIM richiede, tuttavia, la definizione di uno strumento in grado di mappare le variabili di progetto e le loro interconnessioni nelle varie fasi del ciclo di vita, indirizzato alla progettazione di tecnologie per gli involucri adattivi (Battisti, 2019; Crespi, 2017). Questo strumento operativo permette di stimolare il processo creativo ed esplorativo, osservando le peculiarità di tali manufatti, il cui comportamento influisce enormemente sulla fase operativa degli edifici, diminuendone i consumi energetici.

Tali tecnologie hanno allo stesso tempo la potenzialità di produrre delle ricadute sugli impatti ambientali nella fase *Cradle to Gate*, essendo caratterizzate o da materiali di nuova generazione, i cui impatti sono spesso ancora poco conosciuti, o da elementi e componenti di supporto ai meccanismi di facciata difficili da valutare. Infatti, il movimento al quale sono soggetti tali meccanismi, con vita utile di servizio ridotti rispetto agli elementi tradizionali,

può influenzare i cicli di manutenzione, riparazione, sostituzione e ristrutturazione dei sistemi di facciata.

La mappatura, esaminando l'intero ciclo di vita, pone anche l'accento sulla complessità di tali involucri con molteplici funzioni e prestazioni da assolvere, come ad esempio il *Design for Disassembling*, una delle strategie per l'applicazione dei principi per l'economia circolare. In tal senso, la sua rappresentazione grafica riporta anche le categorie di sostenibilità e le funzioni di supporto.

Oggi in Italia siamo davanti a una sensibile evoluzione delle facciate adattive strettamente legato al concetto di *performance*, connesso ai così detti sistemi responsivi, che si basano sulle proprietà dei materiali e la loro capacità di riconfigurarsi se sottoposti a stimoli esterni (Menges, 2012; Worre Foged, 2015; Hensel, 2013), o ai sistemi di controllo con parti mobili e riconfigurabili incentrati sulla relazione input/output, i quali agiscono alla macro-scala, o micro-scala (Attia, 2018; Persiani, 2015; Persiani, 2016). In questa direzione di ricerca esistono esempi di involucri adattivi già realizzati con prodotti in commercio sia ricerche finalizzate allo sviluppo di materiali e/o componenti adattivi.

Al momento attuale studi a livello globale sulle valutazioni LCA di facciate adattive sono molto pochi (Barozzi, 2016; COST, 2018; Piccoli, 2019; Romano, 2018), pertanto l'obiettivo principale della ricerca è quello di approfondire le conoscenze sullo stato di applicazione in Italia dell'analisi del ciclo di vita sugli edifici e sulle facciate adattive, allo scopo di individuare necessità e sfide degli *stakeholders* coinvolti e verificare il grado di usabilità di uno strumento di progettazione di tipo *Life Cycle* costituito da una mappatura di parametri per la progettazione di involucri adattivi.

3.4.2 Metodologia del sondaggio

L'analisi è stata condotta sulla base delle informazioni ottenute dagli attori del processo produttivo nel settore italiano degli edifici sostenibili.

Le informazioni sono state raccolte attraverso un sondaggio elettronico, creato con lo strumento *on-line* Survey Monkey (Survey Monkey, 2019), sotto forma di un'intervista semi-strutturata con una combinazione di domande a risposta multipla e aperte, con richiesta di eventuali commenti.

Gli intervistati sono stati contattati per via telefonica e posta elettronica, invitando a consultare la mappatura caricata *on-line* ed hanno risposto direttamente *on-line*. Le risposte sono state analizzate nel loro insieme e riassunte in testo e grafici. Sono stati intervistati i seguenti *stakeholder*: architetti/ingegneri/società di progettazione, consulenti esterni (certificazioni di sostenibilità), progettisti/produttori di sistemi, componenti, materiali per facciate adattive, imprese di costruzione, *facilities managers*, ricercatori Universitari e di Enti di ricerca. I gestori di proprietà immobiliari/investitori non hanno risposto al sondaggio².

Le principali limitazioni di questo studio sono rappresentate da un ristretto intervallo di tempo nel quale sono state condotte le interviste ed il rischio di errori di interpretazione che sono stati sensibilmente ridotti grazie alle interviste telefoniche e faccia a faccia. Un'altra limitazione è data dai pochi riferimenti bibliografici di studi analoghi in altri paesi (Schlanbusch, 2016).

La compilazione delle domande ha fatto comunque riferimento a una vasta ricerca europea del 7° Programma quadro, condotta sull'armonizzazione e l'uso del LCA nella progettazione e nei processi decisionali (LORELCA, 2011).

² La struttura del sondaggio è organizzata in 5 sezioni:

- Informazioni generali sul partecipante: sede, tipo di attività, esperienza nel campo della sostenibilità, dell'analisi del ciclo di vita, nonché delle facciate adattive. Sono fornite ulteriori domande di approfondimento per valutare il grado di conoscenza dell'argomento;
- Problematiche e necessità legate alla valutazione del ciclo di vita degli edifici e delle facciate adattive: individuazione del grado di importanza dell'LCA nell'ambito della propria attività e criticità riscontrate o riscontrabili nel relativo uso;
- Aspetti relativi alle fasi di progettazione e realizzazione delle facciate adattive: ottenimento di informazioni trasversali riguardanti la sfera di influenza della valutazione *Life Cycle* nei confronti degli obiettivi progettuali di partenza e di arrivo e delle diverse fasi del ciclo di vita dell'involucro adattivo;
- Valutazione sulle finalità e sull'usabilità di uno strumento di progettazione/valutazione di tipo *Life Cycle*: possibili usi e benefici progettuali in sinergia con una lista di obiettivi generali ed il grado di usabilità della mappatura. È data la possibilità all'intervistato di consultare *online* la grafica relativa alla mappatura;
- Pubblicazione intervista ed eventuale futura partecipazione: richiesta di ulteriori commenti per future ricerche, dichiarazioni di responsabilità delle informazioni raccolte.

3.4.3 Risultati del sondaggio

Sono stati raggiunti attraverso il web e con invito diretto via e-mail 45 *stakeholders* dei quali 29 si sono dimostrati interessati nel partecipare. In considerazione dei temi affrontati, ancora “di nicchia” nel mercato delle costruzioni ed in confronto con analoghi sondaggi realizzati in altri paesi (Kara, 2014; James, 2002; Schlanbusch, 2016), si valuta positivamente il riscontro ottenuto in termini di partecipazione. Si premette che nei casi di domande a risposta multipla il numero dei risultati non corrisponde al numero degli intervistati.

Informazioni generali sul partecipante (Parti 1, 2)

La prima parte delle domande richiedeva la localizzazione e il tipo di attività svolta nonché il grado di conoscenza ed esperienza nel campo delle certificazioni ambientali e di strumenti di tipo *Life Cycle*. Ciò ha consentito di comprendere l’approccio dei partecipanti nel rispondere alla quarta e sesta sezione del sondaggio, relative rispettivamente alle Problematiche e necessità legate alla valutazione del ciclo di vita delle facciate ed alla Valutazione sulle finalità e sull’usabilità di uno strumento di progettazione/valutazione di tipo *Life Cycle*.

Gli intervistati, che svolgono prevalentemente la propria attività nel Centro e Nord Italia (Nord 65%, Centro 72%, Sud e isole 17%) appartengono a studi di progettazione per il 48% (incluse attività di consulenza esterna, progettazione/istallazione impianti HVAC e illuminazione, *facilities managers* e ricerca) ed al mondo della ricerca per il 21%. Il 28% degli intervistati sono produttori di sistemi e/o componenti e/o di materiali per facciate adattive, i quali svolgono all’interno dell’azienda anche attività di progettazione e di ricerca. Il resto sono mediamente distribuiti tra le varie categorie di attività presentate nelle risposte a scelta multipla.

Le risposte a quest’ultima domanda (Q.4), presentate come sommatoria delle risposte che consentivano l’opzione di scelta multipla, sono riportate in Figura 3.4.1.

Alla domande relative al grado di conoscenza nel campo delle certificazioni ambientali (Q.5) e di strumenti di tipo *Life Cycle* (Q.7) il 76% ha avuto almeno un’esperienza diretta o indiretta in almeno uno dei due casi ed il Protocollo più utilizzato è il LEED (46%). Le risposte “Altro” denotano anche un interesse ed una conoscenza di base da parte dell’intervistato benché non abbia partecipato ad applicazioni di tipo pratico (Figura 3.4.2). La scala delle valutazioni LCA³ è riportata in Figura 3.4.3.

Nella seconda parte è stato richiesto il grado di esperienza nella progettazione e realizzazione di facciate di tipo adattivo e la fase di attività svolta (Figure 3.4.4 e 3.4.5). 14 intervistati hanno risposto alle risposte di tipo aperto riguardanti la tipologia e le dimensioni dell’edificio al quale è indirizzata l’applicazione delle facciate adattive ed il livello di innovazione raggiunto. Nel caso di sistemi di facciata prevale la destinazione ad uffici e residenziale con tipologia a torre/grattaciolo. Lo studio degli involucri adattivi ha avuto un’applicazione pratica, ma prevalentemente sono stati realizzati studi a livello progettuale o sono stati realizzati dei prototipi a scala 1:1. Il livello di innovazione viene considerato da medio ad alto. Tutti gli intervistati, che hanno avuto esperienza sul tema degli involucri adattivi, hanno risposto alle domande relative alla lettura delle Figure (Q.18 – Q.22). Le risposte sono state riportate in una elaborazione degli schemi (Figura 3.4.6) ed in grafici a nuvola (Figure 3.4.7, 3.4.8, 3.4.9 e 3.4.10).

Si evidenzia che fino al 20% degli intervistati non ha utilizzato gli acronimi o le terminologie proposte, ma ha posto la necessità di specificare con un testo alternativo che è stato reinterpretato dagli autori e inserito negli schemi. In particolare, è significativo un commento relativo ai materiali a cambiamento di fase che possono essere interpretati nel progetto

³ Dalle domande aperte, nelle quali era possibile elencare le caratteristiche delle valutazioni di tipo LCA realizzate, si evince che gli edifici destinati ad uffici ed al settore commerciale, sono la tipologia edilizia più analizzata, risultato probabilmente da porre in relazione alle ragioni per le quali si è svolta tale analisi (es. certificazioni di sostenibilità per aumentare la visibilità dell’investimento immobiliare). Nel caso invece delle restanti scale di applicazioni esse riguardano progetti di ricerca per lo sviluppo del design sia all’interno dell’azienda che per finalità accademiche. Circa l’influenza dell’LCA sulla progettazione e/o realizzazione finale il risultato è stato sicuramente positivo, in particolare per quanto riguarda la scelta dei materiali, dei prodotti e dei sistemi tecnologici in rapporto alla filiera produttiva ed agli impatti ambientali. Nel caso di progetti di sviluppo e ricerca la valutazione ha avuto la finalità di analizzare le alternative di progetto, valutandone vantaggi e svantaggi. Il consumo di risorse è stato un argomento rilevante, mentre gli indicatori analizzati hanno riguardato sia parametri quantitativi che qualitativi (es. consumi energetici, emissioni di CO₂eq, VOC, riutilizzo dei materiali, uso di materiali locali, rintracciabilità della materia prima). Le fonti di dati di input per l’elaborazione del LCA sono rappresentate da banche dati (Ecolvent, OneClick), letteratura (es. DGNB), specifiche tecniche fornite dal cliente (schede materiali e certificazioni di prodotto).

tecnologico a livello di sub-componente e non di materiale, poiché la progettazione della stratigrafia e l'orientamento della facciata costituiscono fattori fondamentali ai fini prestazionali. Relativamente alla Figura 3.4.5, fortemente impostata su un approccio progettuale biomimetico, si è riscontrata un'assenza di corrispondenza tra il contenuto dello schema ed i termini utilizzati per rispondere. D'altra parte le domande dalla Q.18 alla Q.22, sono state formulate senza risposte predefinite allo scopo di comprendere la leggibilità e la usabilità degli schemi proposti.

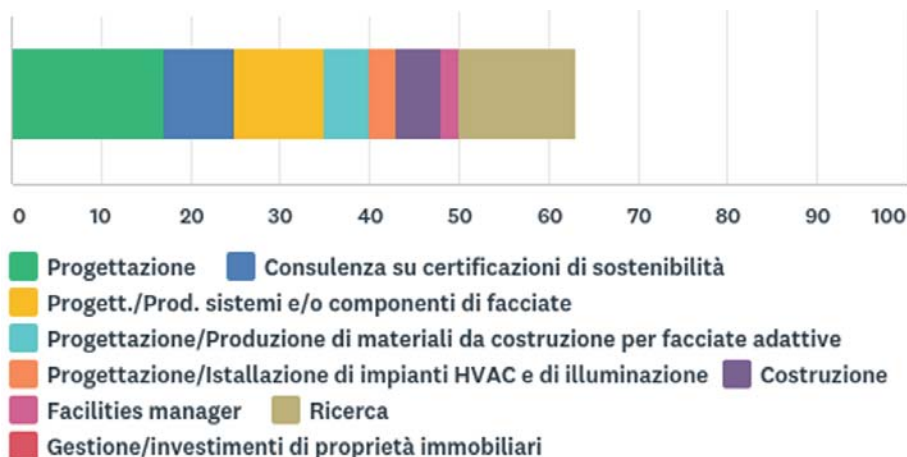


Figura 3.4.1 Attività svolte dagli intervistati. Q.4. Che tipo di attività svolge la sua Società? (risposta multipla)



Figura 3.4.2 Esperienza degli intervistati con strumenti di tipo *Life Cycle Thinking* e valutazione di tipo LCA. Q.7. Ha esperienza diretta o indiretta con strumenti Life cycle thinking e/o di valutazione di tipo LCA?

Un'analisi incrociata in merito al grado di esperienza (Q.5, Q.7 e Q.15) in relazione all'attività svolta (Q.4) dimostra che tra i progettisti/consulenti non vi è una diretta attinenza tra chi ha esperienza di certificazioni ambientali e strumenti di tipo LCA e chi ha progettato facciate adattive.

Vi è tuttavia un effetto a cascata, in termini di interesse per l'argomento proposto oggetto del sondaggio (LCA e Facciate adattive), tra chi ha avuto esperienza (diretta o indiretta) con i Protocolli di Sostenibilità. Nel campo della ricerca accademica vi è una più stretta correlazione tra esperienza in LCA ed involucri adattivi. Invece, nel settore produttivo la corrispondenza tra le tre tematiche di esperienza è pressoché totale.

Figura 3.4.3 Scala di valutazioni di LCA elaborate dagli intervistati.
Q.11. In caso di valutazione LCA a che scala è stata condotta?

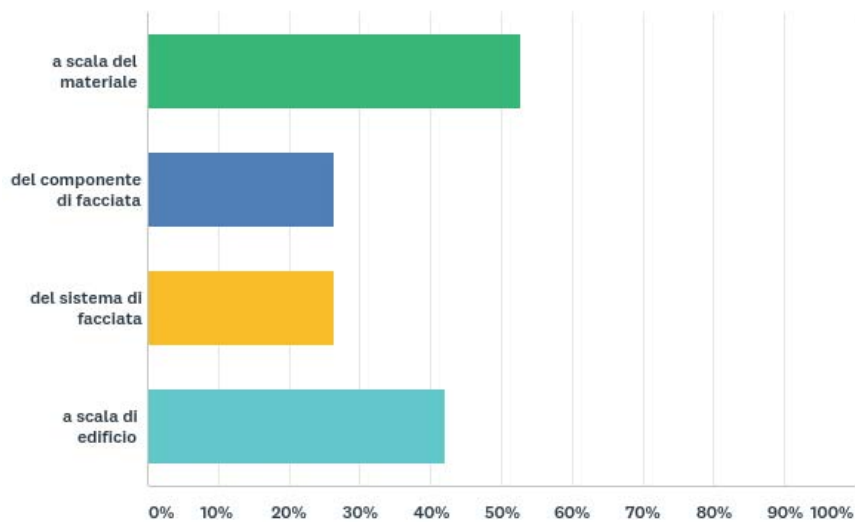


Figura 3.4.4 Esperienza degli intervistati in facciate di tipo adattivo - Scala di progettazione e/o realizzazione.
Q.15. In caso di valutazione LCA a che scala è stata condotta?

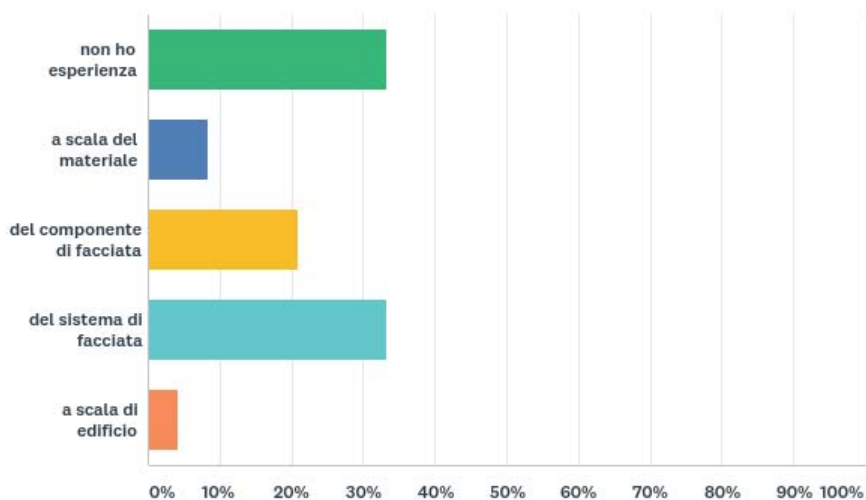
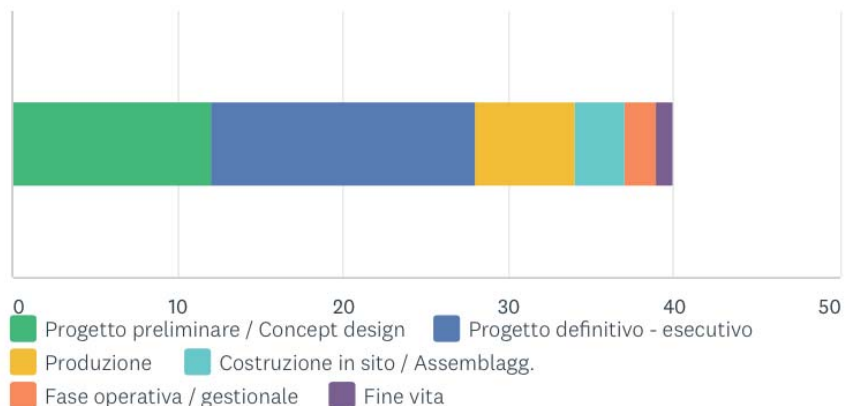


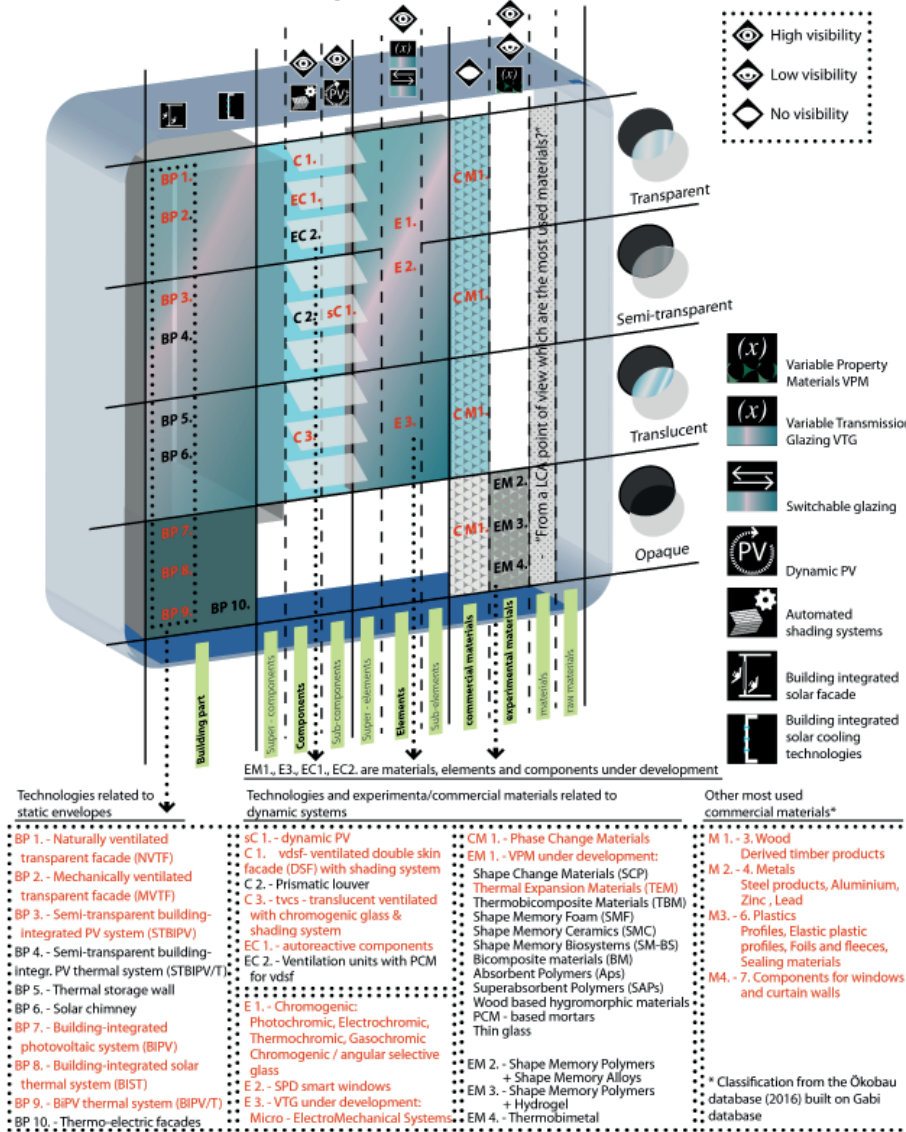
Figura 3.4.5 Esperienza degli intervistati in facciate di tipo adattivo - Fase di attività svolta.
Q.16. In quale fase si svolge la sua attività nel campo delle facciate tradizionali/adattive? (risposta multipla)



What is an Adaptive Building Skin?

LCA stages involved: A1-A3; B6; C3, C4; D

Which are the most common ABS technologies and materials?



Problematiche e necessità legate alla valutazione del ciclo di vita degli edifici

A questa sezione hanno risposto circa il 70% degli intervistati. Il confronto tra le domande sull'importanza della valutazione ambientale del ciclo di vita degli edifici per l'attività svolta (Q.23) e per il complesso della sostenibilità degli edifici (Q.24) dimostra che se nella totalità degli intervistati la valutazione LCA è ritenuta da mediamente a molto importante per la sostenibilità degli edifici, il 30% dei rispondenti non reputa che nella propria attività tale strumento possa essere di grande utilità. Ciò è da mettere in relazione con il tipo di attività svolta (es. ricerca in altri campi, sola progettazione).

Figura 3.4.6 Rielaborazione della Figura n. 1, relativa alle Tipologie di ABS. Classificazione dei materiali e delle tecnologie più diffuse (Crespi 2019), sulla base delle risposte alla domanda aperta Q.18. In rosso le tipologie utilizzate tra i rispondenti.

Q.18. In caso di esperienza con la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo, con riferimento alla Figura n. 1, quali sono i componenti/elementi/materiali che la contraddistinguono l'adattività?

Materiale componente elemento

Figura 3.4.7 Grafico a nuvola dei termini usati dagli intervistati per rispondere alla domanda aperta Q.19.

Q.19. In caso di esperienza con la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo, con riferimento alla Figura n. 2 (Crespi 2019), a quale livello e dove sono integrate le proprietà adattive?



Figura 3.4.8 Grafico a nuvola dei termini usati dagli intervistati per rispondere alla domanda aperta Q20.

Q.20. In caso di esperienza con la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo, con riferimento alla Figura n. 3 [Crespi 2019], come funziona l'adattività?



Figura 3.4.9 Grafico a nuvola dei termini usati dagli intervistati per rispondere alla domanda aperta Q21.

Q.21. In caso di esperienza con la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo, con riferimento alla Figura n. 4 [Crespi 2019], in quale intervallo di tempo si manifesta l'adattività?



Figura 3.4.10 Grafico a nuvola dei termini usati dagli intervistati per rispondere alla domanda aperta Q22.

Q.22. In caso di esperienza con la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo, con riferimento alla Figura n. 5 [Crespi 2019], a che scopo è stata introdotta l'adattività?

La Figura 3.4.11 mostra i risultati relativi alle lacune conoscitive più diffuse nel campo della valutazione del ciclo di vita degli edifici, ed in particolare delle facciate adattive (Q.25).

In prevalenza si lamenta l'assenza di dati di input di alcuni prodotti (58% dei rispondenti) e la mancanza di conoscenze sui benefici ambientali nelle fasi di manutenzione/riparazione (53%) e riciclo/riuso a fine vita (53%).

Tale risultato corrisponde con le due fasi del ciclo di vita degli edifici, ed in particolare delle facciate adattive, che hanno, secondo gli intervistati, la maggior mancanza di dati e linee guida: Fase d'uso (117%) e Fine vita (50%) (Q.26). Il 72% degli intervistati ritiene che il fattore che ostacola la valutazione del Ciclo di vita delle facciate adattive è la difficoltà nel reperimento dei dati (Q.27). Relativamente agli aspetti che rendono difficoltoso l'utilizzo effettivo dei risultati di un LCA i risultati si distribuiscono mediamente tra le possibili risposte: Comparabilità (37%), Trasparenza (26%), Mancanza di conoscenze adeguate per la valutazione dei risultati (32%). Un intervistato ha evidenziato come la difficoltà risieda nell'assenza di preparazione culturale da parte degli investitori che non possiedono modelli di mercato sostenibili e a lungo termine capaci di garantire un ritorno sugli investimenti a corto termine (Q.28).

Aspetti relativi alla progettazione e realizzazione delle facciate adattive

Circa il 70% degli intervistati ha risposto a questo gruppo di domande (Q.29 – Q.33). Da un confronto tra l'attività svolta dagli intervistati e le risposte della Sezione n. 5 non risultano differenze sostanziali per tipologia di attività.

Tra i fattori che influenzano la progettazione e la realizzazione delle facciate adattive non risulta tra gli intervistati che ve ne sia qualcuno più preponderante rispetto ad altri. Le prestazioni energetiche e di impatto ambientale costituiscono tuttavia il 71% delle scelte (Q.29) (Figura n. 12).

Tra gli scenari possibili per la valutazione del ciclo di vita di facciate adattive la scelta è indirizzata alla vita utile della facciata ed agli scenari di manutenzione ed operatività (Q.31) (Figura n. 13).

L'analisi incrociata delle risposte Q.25 (*), Q.26 (*), Q.29 (*) e Q.31 (*) mostra una coerenza nei risultati indirizzati ad evidenziare l'importanza di avere dati di partenza sulla vita utile delle facciate adattive, in particolare relativamente alla fase d'uso (manutenzione e riparazione), alla quale è rivolto l'interesse della maggior parte degli intervistati. Si sottolinea anche la differenza tra obiettivi progettuali di partenza (prestazioni energetiche e di comfort ambientale) ed obiettivi LCA (impatti ambientali delle fasi di manutenzione e riparazione), che sottintende un interesse per nuovi aspetti di innovazione e competitività nel mercato degli involucri adattivi.

D'altra parte i fattori relativi all'Innovazione (43% Q.29) ed al Costo (38% Q.29) devono essere messi in relazione con l'aspetto tecnologico, che caratterizza la progettazione di tali facciate, e che spesso non è controllato da tutti i punti di vista necessari ed al momento opportuno (es. ricadute economiche ed ambientali sulla vita utile dell'edificio).

A tal proposito le risposte alla domanda sui diversi stadi del processo nel quale ha più impatto l'LCA di una facciata adattiva (Q.30) denotano come sia perfettamente apodittico da parte degli intervistati (90% dei rispondenti) realizzare un LCA durante la fase progettuale, e non *ex-post*, come purtroppo spesso accade nel caso in cui sia richiesta in fase di certificazioni di sostenibilità. In merito alla tipologia di dati per la progettazione di facciate adattive l'87,50% dei rispondenti fa uso di specifiche di prodotto e l'ambiente BIM è utilizzato dal 50% dei rispondenti (n. 20/29).

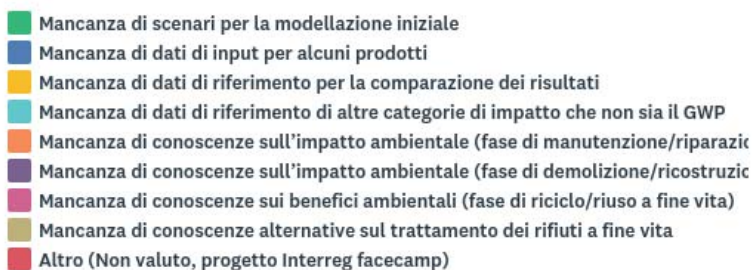
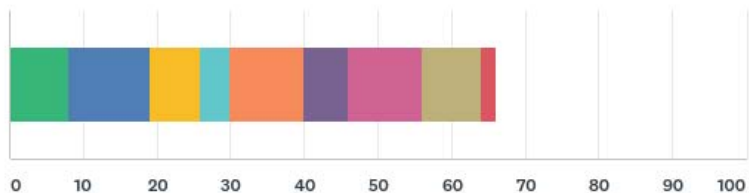


Figura 3.4.11 Risposte alla domanda Q.25
Q.25. Qual è la lacuna conoscitiva più diffusa nel campo della valutazione del ciclo di vita degli edifici, ed in particolare delle facciate adattive? (risposta multipla)

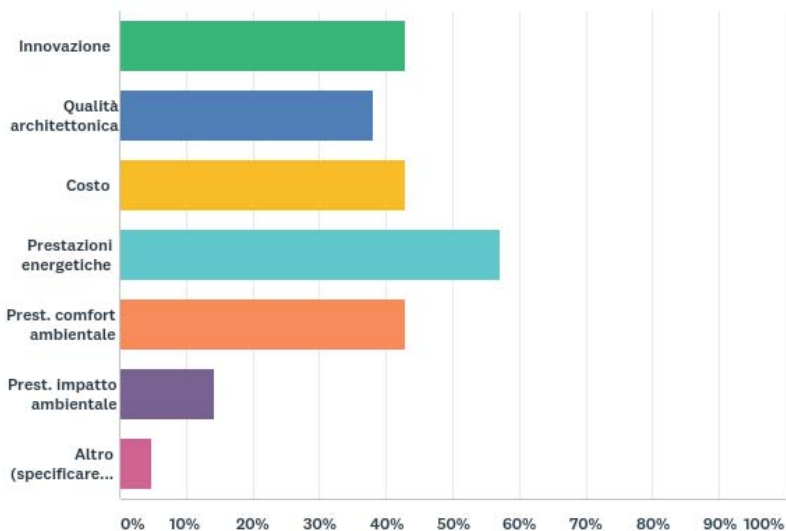


Figura 3.4.12 Risposte alla domanda Q.29
Q.29. Qual è il fattore più significativo che influenza la progettazione e/o realizzazione di facciate di tipo adattivo? (risposta multipla)

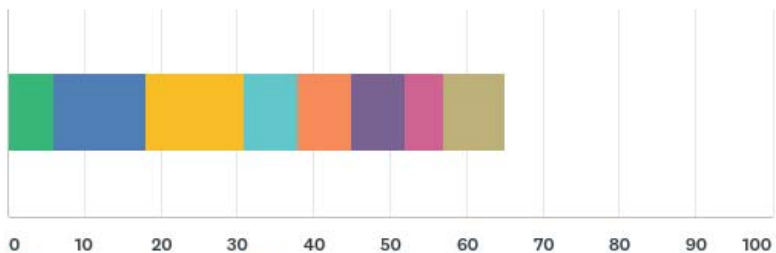


Figura 3.4.13 Risposte alla domanda Q.31
Q.31. Quale dei seguenti scenari sceglierebbe per la valutazione del ciclo di vita di facciate di tipo adattivo?

Valutazione dell'usabilità di uno strumento di progettazione/valutazione di tipo Life Cycle

Circa il 62% degli intervistati ha risposto a questo gruppo di domande relative all'usabilità della mappatura proposta. Alla domanda relativa agli impatti ambientali sulle diverse fasi del ciclo di vita (Q.34) il più rilevante per i rispondenti risulta la Fornitura di materie prime e secondarie (44%), seguito dalla fase d'uso (34%) (Figura 3.4.14). In merito all'aspetto più determinante per l'uso della mappatura (Q.35) si sono orientati verso l'Innovazione (22%) e le Prestazioni energetiche (22%). Per la totalità dei rispondenti tra le finalità progettuali di una valutazione LCA di una facciata adattiva (Q.37) non emerge un fattore determinante tra quelli proposti (Figura 3.4.15).

Riguardo i parametri rappresentati nella mappatura (Q.38), anche in questo caso vi è un interesse per la fase operativa (es. manutenzione, durabilità) e di fine vita (es. potenziale di riuso dei componenti, facilità di smontaggio) e per i parametri di tipo qualitativo.

Nel complesso il 94% ritengono che la mappatura sia molto o mediamente utile, in particolare per evidenziare aree problematiche (67%). Ciò conferma la finalità di tipo progettuale orientata a far comprendere e a far riflettere sulla complessità dei sistemi di facciata sotto più punti di vista.

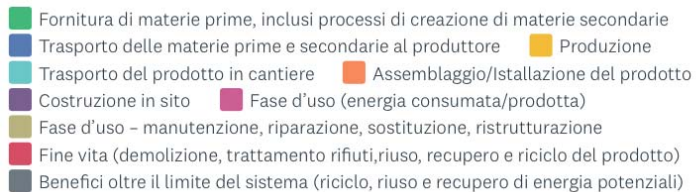
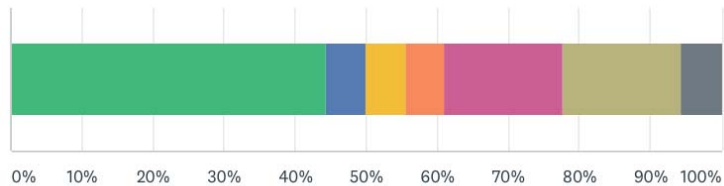


Figura 3.4.14 Risposte alla domanda Q.34 Q.34. Nel caso svolgesse una valutazione del ciclo di vita su facciate di tipo adattivo quale è la fase che avrebbe più impatto dal punto di vista ambientale ?

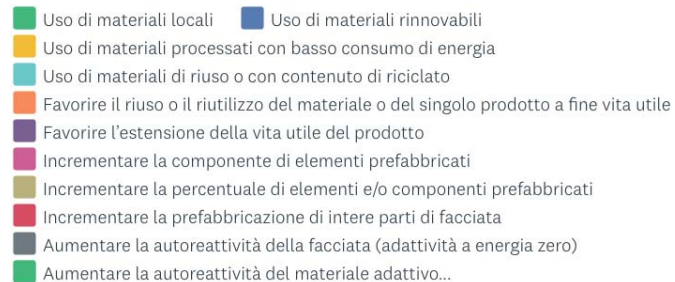
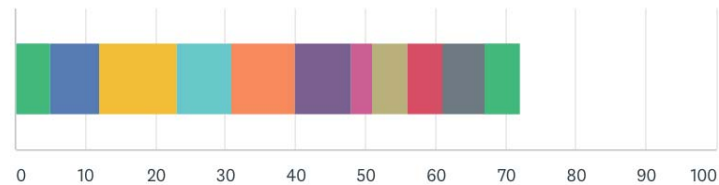


Figura 3.4.15 Risposte alla domanda Q.37 Q.37. Nel caso svolgesse una valutazione del ciclo di vita su facciate di tipo adattivo quale ne sarebbe la finalità progettuale?

3.4.4 Conclusioni

Si valuta positivamente il riscontro ottenuto considerato l'ambito ristretto delle tematiche affrontate. Si auspica un futuro coinvolgimento degli investitori immobiliari, poiché, come evidenziato anche da un intervistato, si riscontra una mancanza di sensibilizzazione su tali temi a causa di un'assenza di modelli di mercato sostenibili e a lungo termine capaci di garantire un ritorno sugli investimenti a breve termine. In tal senso il sondaggio è stato utile anche nel comprendere come sia necessario intraprendere un'opera di diffusione delle metodologie LCA soprattutto tra i progettisti e gli investitori che hanno entrambi responsabilità nel processo iniziale.

L'interesse per la mappatura proposta è distribuito tra le diverse attività degli *stakeholders* coinvolti e aumenta per chi si occupa di ricerca e sostenibilità. Ciò a dimostrazione che la progettazione di facciate adattive richiede non solo una maggiore preparazione tecnica e culturale, ma anche una più stretta collaborazione tra il mondo accademico e quello produttivo.

L'interesse è rivolto principalmente verso la fase di manutenzione e riparazione e riciclo/riuso a fine vita che però viene bilanciato con altre priorità tra cui in particolare l'Innovazione (22%) e le prestazioni energetiche, dovuto, da un lato, alla necessità di rispondere ai criteri dei protocolli di sostenibilità e dall'altro all'interesse per nuovi aspetti di competitività nel mercato degli involucri adattivi da parte dei produttori.

In merito al sistema di classificazione proposto (Figure da 3.4.1 a 3.4.5) l'analisi delle parole, nei grafici a nuvola, evidenzia la corrispondenza con gli esempi riportati dagli intervistati, a meno di alcuni casi che porteranno a una revisione degli schemi e ad una successiva implementazione della mappatura. Essa si conferma comunque come strumento per l'elaborazione del pensiero progettuale e di supporto alla ricerca soprattutto in considerazione che l'ambiente BIM sarà alla base di metodi di ottimizzazione computerizzata. Le risposte al sondaggio saranno utili alla successiva implementazione della mappatura e ad applicazioni pratiche nei successivi sviluppi della ricerca, considerando le esistenti lacune nel campo della valutazione del ciclo di vita.

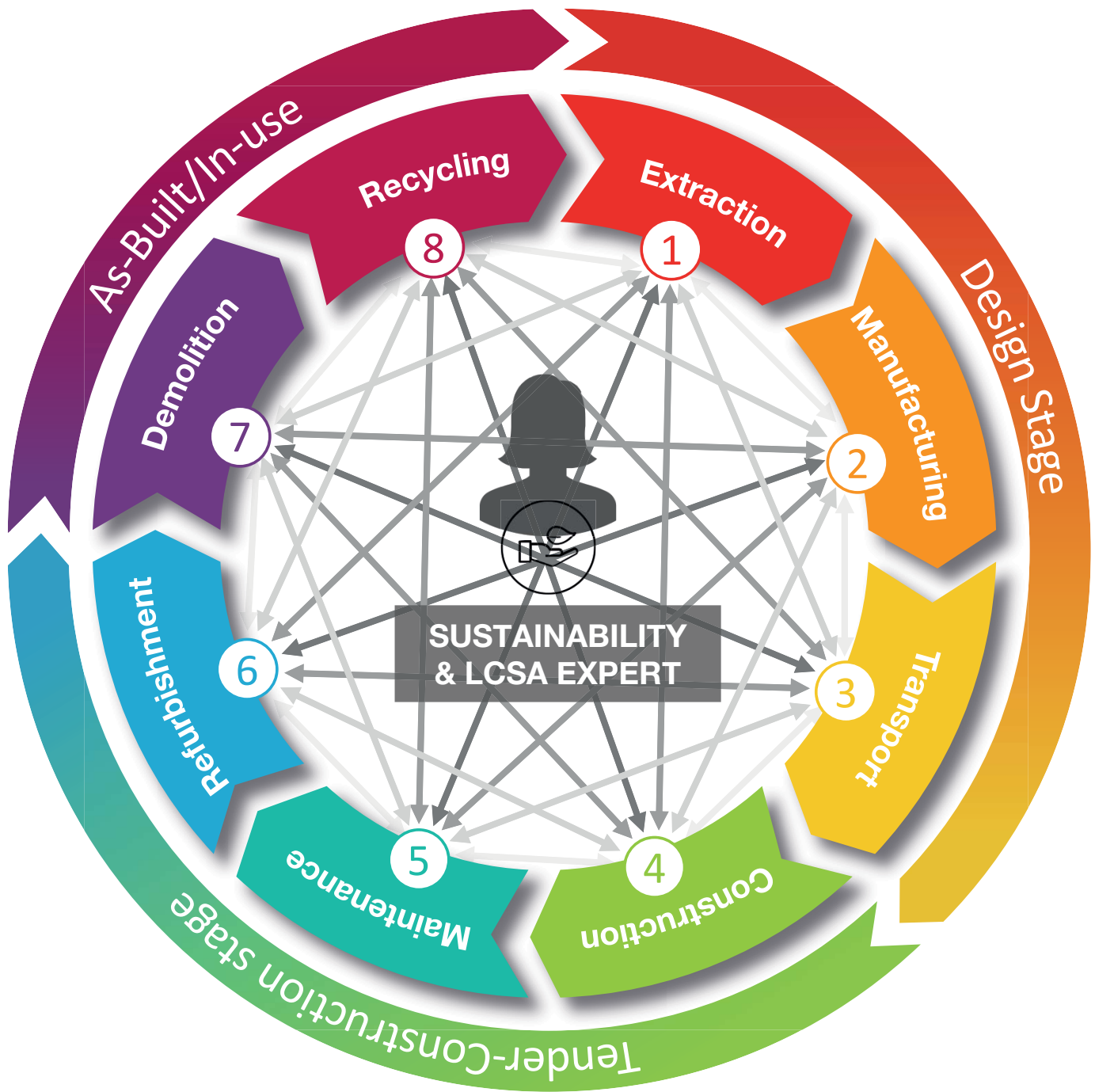
Bibliografia

- Barozzi M., Lienhard J., Zanelli A., Monticelli C., 2016. "The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic Architecture", *Procedia Engineering*, vol. 155, pp. 275-284.
- Battisti A., Persiani S.G.L., Crespi M., 2019. "Review and Mapping of Parameters for the Early Stage Design of Adaptive Building Technologies through Life Cycle Assessment Tools", *Energies*, vol. 12, 1729.
- Basbagill J.P., Flager F., Lepech M., 2017. "Measuring the impact of dynamic life cycle performance feedback on conceptual building design", *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 726-735.
- Bueno C., Fabricio M.M., 2018. "Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in", *Automation in Construction*, vol. 90, pp. 188-200.
- Cavaliere C., Dell'Osso G.R., Pierucci A., Iannone F., 2018. "Life cycle assessment data structure for building information modelling", *Journal of Cleaner Production*, vol. 199, pp. 193-204, doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.149
- Crespi M., Persiani S.G.L., Battisti A., 2017. "Mapping of LCA parameters as a tool for the design

- of sustainable cycle-based adaptive building skins", *12th International Conference on Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland, 2-3 Ott.
- Crespi M., Persiani S.G.L., 2019. "Rethinking Adaptive Building Skins from a Life Cycle Assessment perspective", *Journal of Façade Design & Engineering*, vol. 7, pp. 21-43.
- COST Action TU1403, 2018. *Case studies – Adaptive Façade Network*, http://tu1403.eu/?page_id=32
- Direttiva 2018/844/UE (2018). *Direttiva UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*.
- EU Commission, 2015. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle regioni. *L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare*. COM (2015). 614 final.
- EU Commission, 2014. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle regioni. *Opportunità per migliorare l'efficienza delle risorse nell'edilizia*. COM (2014). 445 final.
- Foged I.W, 2015. *Environmental Tectonics: Matter Based Architectural Computation*, Aalborg Universitetsforlag, Ph.d.-serien for Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet.
- Green Building Council Italia, 2019/1. *Position paper: Life Cycle Assessment in edilizia*. https://gbcitalia.org/documents/20182/565254/GBC+Italia_Position+Paper+LCA_05.pdf/3526a830-9ba1-471b-b1e4-975de1e36846
- Green Building Council Italia, 2019/2. *Position paper: Economia circolare in edilizia*. https://gbcitalia.org/documents/20182/565254/GBC+Italia_Position+Paper+EC_04.pdf
- Hensel M.U., 2013. *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. ed. AD Wiley, Brisbane, doi: 10.1002/9781118640630
- Hollberg A., Ruth J., 2016. "LCA in architectural design—a parametric approach", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, pp. 943-960.
- James K.L., Grant T., Sonneveld K., 2002. "Stakeholder involvement in Australian paper and packaging waste management LCA study", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 7-3, pp. 151-157.
- Jusselme T., Rey E., Andersen M., 2017. "An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based datadriven design method", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 123–132.
- Kara S., Ibbotson S., Kayis B., 2014. "Sustainable product development in practice: An international survey", *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 25-6, pp. 848-872.
- Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., Goia F., 2018. "Current Trends and Future Challenges in the Performance Assessment of Adaptive Façade Systems", *Energy and Buildings*, vol. 179, pp. 165-182.
- LoRe-LCA, 2011. viewed 26 Sep 2019, <https://www.sintef.no/projectweb/lore-ica/>
- Menges A., 2012. "Biomimetic design processes in architecture: Morphogenetic and evolutionary computational design", *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 7-1.
- Persiani S.G.L., Battisti A., Wolf T., 2015. "Recurring moving patterns in nature for a biomimetic optimization of autoreactive systems", *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Amsterdam, NL.
- Persiani S.G.L., Battisti A., Wolf T., 2016. "Autoreactive architectural facades – discussing

- unpowered kinetic building skins and the method of evolutionary optimization", *Proceedings of the 11th Conference on Adaptive Building Skins*, Switzerland, 10-11 Oct.
- Piccoli E., Dama A., Dolara A., Leva S., 2019. "Experimental validation of a model for PV systems under partial shading for building integrated applications", *Solar Energy*, vol. 183, pp. 356–370.
- Pierucci A., Dell'Osso G.R., Cavalliere C., 2015. "Il management del flusso informativo delle costruzioni mediante valutazioni LCA", in: ISTEА (ed), *Sostenibilità ambientale Economia circolare e produzione edilizia*, ed. Maggioli, Milano.
- Poljanšek M., 2017. *Building Information Modelling (BIM) standardization*. JRC Technical report. EUR 28977 EN, European Commission.
- Romano R., Aelenei L., Aelenei D., Mazzucchelli E.S., 2018. "What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective", *Journal of Façade Design & Engineering*, vol. 6, pp. 65-76.
- Schlanbusch R.D., Fufa S.M., Häkkinen T., Vares S., Birgisdottir H., Ylmén P., 2016. "Experiences with LCA in the Nordic Building Industry. Challenges, Needs and Solutions", *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 82–93.
- Soust-Verdaguer B., Llatas C., García-Martínez A, 2017. "Critical review of BIM-based LCA method to buildings", *Energy and Buildings*, vol. 136, pp. 110-120.
- Survey Monkey, 2019. <https://it.surveymonkey.com>
- UNEP, 2011. *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication - A Synthesis for Policy Makers*. www.unep.org/greeneconomy
- Volk R., Stengel J., Schultmann F., 2014. "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs", *Automation in Construction*, vol. 38, pp. 109–127.

4. Strumenti di valutazione e certificazione ambientale LCA-based



4.1 LCA nei Green Building Rating Systems DGNB e Level(s)

L'ambiente costruito è responsabile di un'elevata quota globale di impatti ambientali, economici e sociali (Gervasio, Dimova, 2018). La loro mitigazione è un obiettivo prioritario dell'Unione Europea, che perciò punta a sviluppare un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato, investendo anzitutto sul rinnovo del parco immobiliare, che pesa in misura rilevante sul bilancio, in termini energetici e climatici (EC, C(2019) 4135 *final*; BPIE Report, 2020). Secondo la *Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse*, focalizzata sulle azioni per favorire la trasformazione dell'economia europea in un'economia sostenibile entro il 2050, miglioramenti nelle soluzioni costruttive, e conseguentemente più in generale nell'ambiente costruito, ridurrebbero del 42% il consumo energetico in ambito europeo, di circa il 35% le nostre emissioni di gas serra, di oltre il 50% l'estrazione di materiali e del 30% il prelievo idrico (EC, COM(2011)571).

Di fatto la necessità di operare tenendo conto delle pressioni ambientali che si generano nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio è oggetto di diverse comunicazioni comunitarie, tra cui la Comunicazione *Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector* (COM (2014) 445), in cui la Commissione Europea (CE) pone l'accento sulla necessità di definire un "approccio comune" per valutare le prestazioni ambientali degli edifici durante tutto l'intero ciclo di vita. Nel settore delle costruzioni, per valutare il raggiungimento di obiettivi di sostenibilità ambientale, economica e in parte sociale, si è diffuso l'utilizzo di strumenti o sistemi di valutazione multicriterio (*Green Building Rating Systems* -GBRSs), basati su indicatori che misurano la performance ambientale dell'edificio considerando più ambiti - dal fabbisogno energetico, ai consumi di acqua, alla gestione dei rifiuti - in più fasi del ciclo di vita, e includendo talvolta il *Life Cycle Assessment* (LCA) e/o etichette ambientali fondate sull'applicazione di tale metodologia.

4.1.1 Sistemi di valutazione multicriterio della sostenibilità

I sistemi di valutazione della progettazione sostenibile sono comparsi all'inizio degli anni '90 come metodo semplificato per migliorare le prestazioni degli edifici, focalizzati sul risparmio energetico e sulla riduzione al minimo dell'impatto ambientale (Hu et al., 2017).

Nel 1990 è stata lanciata da parte del Building Research Establishment (BRE) la prima versione di *Building Research Environmental Assessment Method* (BREEAM) (Olakitan Atanda, 2019), considerato il primo GBRS al mondo. A distanza di circa un decennio il Green Building Council statunitense (USGB), un'organizzazione non governativa che comprende rappresentanti dell'industria e del mondo accademico e dell'Amministrazione, ha lanciato negli USA la versione 1.0 del sistema *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) (Bernardi et al., 2017). Da allora, il numero di protocolli sviluppati e introdotti sul mercato in tutto il mondo ha visto un rapido aumento.

Elisabetta Palumbo

Ricercatore di tipo B di Produzione Edilizia presso il Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate dell'Università degli Studi di Bergamo.
E-mail: elisabetta.palumbo@unibg.it

Secondo Bernardi et al. (2017), tra schemi LCA e sistemi di *rating*, nel periodo 1995-2014 in tutto il mondo sono stati rilasciati più di 70 sistemi di valutazione degli edifici sostenibili. Il numero di edifici certificati è aumentato in modo esponenziale, passando da poche decine alla fine del XX secolo, a decine di migliaia oggi (Varma et al., 2019): il 58% dei GBRs più rappresentativi in Europa è stato lanciato tra l'anno 2010 e il 2011 (Figura 4.1.1).

Figura 4.1.1 Sviluppo dei GBRs in Europa nell'arco temporale 1995 - 2015.



Tra questi protocolli, l'americano LEED e l'inglese BREEAM sono considerati come i più diffusi, anche se il tedesco *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen* (DGNB) e il francese *Haute Qualité Environnementale* (HQE) hanno raggiunto un certo grado di successo internazionale. Oltre a BREEAM, DGNB, HQE e LEED, molti Paesi europei hanno sviluppato i propri GBRs sulla base di quattro diverse strategie e direzioni (Tabella 4.1.1), determinando un totale di: 37 certificati internazionali, 54 europei e di oltre 500 diversi indicatori (Sánchez Cornero et al., 2019).

| Paese | nome GBRs | Organizzazione/ente | Anno di avvio | Versione |
|--------------------|--------------|---|---------------|----------------|
| Regno Unito | BREEAM | BRE (Building Research Establishment) | 1990 | Internazionale |
| | HQM | | 2015 | Nazionale |
| | CEEQUAL | | 2011 | Internazionale |
| Francia | HQE | HQE (Haute Qualité Environnementale) | 1997 | Internazionale |
| Svizzera | Minergie ECO | MINERGIE | 1998 | Nazionale |
| | BREEAM CH | DIFNI | 2011 | Nazionale |
| Italia | ITACA | IISBE Italia | 2004 | Nazionale |
| | LEED ITALY | GBC Italy | 2006 | Nazionale |
| Germania | DGNB | German Sustainable Building Council | 2008 | Internazionale |
| | BREEAM DE | TÜV SÜD DIFNI | 2011 | Nazionale |
| Portogallo | BNB | Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen | 2010 | Nazionale |
| | SBToolPT | iiSBE PT | 2009 | Nazionale |
| Austria | TQB 2010 | OGNB | 2010 | Nazionale |
| | BREEAM AT | DIFNI | | |
| Repubblica Ceca | SBToolCZ | iiSBE Czech/CIDEAS | 2010 | Nazionale |
| Olanda | BREEAM NL | Dutch GBC | 2011 | Nazionale |
| Norvegia | BREEAM NW | Norwegian GBC | 2011 | Nazionale |
| Spagna | VERDE | Spanish GBC | 2011 | Nazionale |
| | BREEAM ES | DIFNI | 2010 | Nazionale |
| Svezia | BREEAM SE | Swedish GBC | 2011 | Nazionale |
| | Miljöbyggnad | | 2011 | Nazionale |

Tabella 4.1.1 Elenco dei *Green Building Rating Systems* presenti in Europa. Rielaborazione da Sánchez Cornero et al., 2019.

A livello internazionale, la valutazione della sostenibilità ambientale dei progetti e degli edifici nei diversi Paesi e contesti si basa su molteplici indicatori e sistemi di certificazione. La rassegna della letteratura sulla valutazione delle prestazioni di sostenibilità dei progetti e degli edifici condotta da Tupenaite et al. (2017) rivela che particolari indicatori e la loro significatività dipendono fortemente dal contesto ambientale, economico e sociale, ragione per cui la maggior parte dei protocolli mira a sviluppare sistemi nazionali di valutazione, e ciò almeno in parte ne spiega la proliferazione.

Sebbene lo sviluppo e l'utilizzo di metodi di misurazione della sostenibilità degli edifici e di *benchmark* siano considerati delle soluzioni che promuovono un ambiente costruito più sostenibile (Mateus et al., 2011; Zhang et al., 2011) e nonostante più autori identifichino nei GBRSs la possibilità di superare gli strumenti di *benchmark* energetico a favore di valutazioni più complete ed estese agli altri ambiti della sostenibilità come acqua, materiali, rifiuti e suolo, un numero così ampio ed eterogeneo di sistemi e strumenti rende necessaria l'identificazione di un insieme di criteri e di indicatori utilizzabile e riconoscibile dalle differenti parti interessate in qualsiasi paese. Anche per ottenere una ripartizione bilanciata e comparabile degli indicatori fra le tre principali aree di valutazione della sostenibilità, che nei GBRS oggi vedono prevalere gli indicatori di quella ambientale (0.48) rispetto a quelli di ambito economico (0.268) e sociale (0.24) (Tupenaite et al., 2017).

Malgrado i progressi nello sviluppo di indicatori e quadri complessi per la valutazione della sostenibilità, già da diversi anni più fonti hanno evidenziato la carenza di un *framework* adeguato ad assistere e supportare i team di progetto coinvolti nella progettazione e realizzazione di edifici sostenibili (Higham, et al., 2016; Politi e Antonini, 2017).

Con l'intento di migliorare la sostenibilità degli edifici all'interno dell'Europa e di raccordare l'intera catena del valore del settore attorno ad un linguaggio comune, promuovendo così il miglioramento delle prestazioni degli edifici (European Commission, 2017), nell'agosto 2017 è stato lanciato dalla Commissione Europea il quadro volontario Level(s), la cui versione *beta testing* è stata sottoposta a revisione (Dodd et al., 2017), prima del lancio conclusivo a gennaio 2021.

Focalizzato sulla misurazione delle prestazioni di sostenibilità e di impatto lungo l'intero ciclo di vita, Level(s) è incentrato attorno alle tre seguenti aree tematiche: 1. prestazioni ambientali del ciclo di vita, 2. salute e benessere, 3. costo, valore e rischio (Tabella 4.1.4).

L'intento di facilitare la confrontabilità tra i vari sistemi ha orientato quindi la Commissione Europea ad incentrare in un primo momento l'attenzione verso l'approccio al ciclo di vita (*beta version* 2015 - 2017), incoraggiando l'applicazione della metodologia LCA anche da parte dei meno esperti, da cui appunto la denominazione Level(s).

La restituzione dei *feedback* ricevuti dalla fase di *testing* ha meglio declinato l'approccio *life cycle* rispetto alle fasi progettuali e costruttive di un edificio, declinando quindi i tre Livelli (L) come: fase ideativo-progettuale (L1), progettazione esecutiva (L2) e verifica post costruzione e in uso (L3).

4.1.2 Differenti approcci della LCA alla scala di edificio: riferimenti metodologici

I riferimenti normativi che regolano l'applicazione metodologica, l'inquadramento e i principi generali per la valutazione ambientale di un prodotto o servizio lungo tutto il suo ciclo di vita sono descritti nella norma ISO 14040:2006 *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*. Più in dettaglio, i requisiti specifici e le linee guida per la

realizzazione di una LCA sono regolati dalla ISO 14044:2006 *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*.

Dal lavoro condotto dal CEN TC 350, incaricato dello sviluppo di norme per la valutazione della sostenibilità delle opere edilizie, emerge che la LCA delle opere di costruzione può essere eseguita a due livelli:

- a livello di prodotto, secondo la norma UNI EN 15804:2012+A2:2019 *Sostenibilità delle opere di costruzione - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Norme fondamentali per la categoria di prodotti da costruzione*;

- a livello di edificio, secondo la norma UNI EN 15978:2011 *Sostenibilità delle opere di costruzione - Valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici*.

Entrambi gli standard europei che regolano la LCA nell'ambito delle costruzioni suddividono il ciclo di vita dell'edificio in cinque fasi - prodotto (A1-A3), costruzione (A4-A5), uso (B1-B7), fine vita (C1-C4), e una fase aggiuntiva per i benefici oltre i confini del sistema (D) - e nelle relative sottocategorie dette "moduli" (Figura 4.1.2).

Oltre a questi standard, la comunità scientifica ha sviluppato azioni complementari con lo scopo di migliorare l'applicazione della LCA nel settore edile: una di esse è la *EeBGuide* (Wittstock et al., 2011), elaborata con il sostegno della Commissione Europea, i cui indirizzi costituiscono il documento di orientamento per la maggior parte dei sistemi di certificazione degli edifici che adottando la LCA.

Includere all'interno di un sistema di *rating* una LCA completa *from cradle to grave* - ovvero basata sulla stima di tutte le fasi del ciclo di vita - potrebbe produrre un forte aggravio di tempo e risorse, ragion per cui sono stati introdotti approcci semplificati (Hollberg, 2017).

| | Tipologie | | |
|--|--|---|--|
| | Screening LCA | Simplified LCA | Complete LCA |
| Finalità | Stima iniziale delle prestazioni ambientali nelle prime fasi di progettazione | Valutazione rapida di un edificio o di un prodotto in una determinata fase del processo di progettazione dell'edificio. | Identificare l'impatto ambientale delle singole fasi del ciclo di vita, degli elementi costruttivi, dei prodotti, dei componenti o dei servizi. Riflette l'impostazione metodologica data dalla norma ISO 14040/44. |
| Indicatori inclusi | Possono essere valutati uno o più indicatori, i più utilizzati sono: <ul style="list-style-type: none"> • GWP= potenziale di riscaldamento globale • PENRT=uso totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili • PERT=uso totale di risorse energetiche primarie rinnovabili | Set ridotto di indicatori <ul style="list-style-type: none"> • GWP= potenziale di riscaldamento globale • PENRT=uso totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili • PERT=uso totale di risorse energetiche primarie rinnovabili | Serie completa delle categorie di impatto ambientale tratte dagli standards EN 15804 e EN 15978 |
| Requisiti dei dati | Per lo più dati generici e ipotesi relative al Paese da cui proviene l'edificio o il prodotto. Quando non è possibile, sono accettate le ipotesi relative a Paesi vicini o i dati medi europei o globali. | I dati dovrebbero riferirsi al Paese da cui proviene l'edificio o il prodotto. Quando non è possibile, si accettano ipotesi riferite a Paesi vicini o dati medi europei. | I dati dovrebbero rappresentare il Paese in cui il materiale viene venduto, o in cui si svolge il processo o l'attività. |
| Fasi del ciclo di vita obbligatorie | A1-A3 (manifattura) B6 (energia in uso), B7 (acqua in uso) | A1-A3(manifattura) B4 (sostituzione), B6 (energia in uso), B7 (acqua in uso) C3 (trattamento dei rifiuti) C4 (smaltimento) D (benefici oltre i confini) | Tutte le fasi del ciclo di vita A1-A3 (manifattura) A4-A5 (trasporto-costruzione) B1, (uso), B2-B4 (manutenzione) B5 (ristrutturazione) B6- B7(energia-acqua in uso), C1-C4 (fine vita) D (benefici oltre i confini) |
| Unità tecnologiche da esaminare | Strutture di fondazione, strutture di elevazione verticali e orizzontali, strutture di contenimento, chiusure verticali ed orizzontali (superiori e inferiori), finiture/riestimenti interni | Strutture di fondazione, strutture di elevazione verticali e orizzontali, strutture di contenimento, chiusure verticali ed orizzontali (superiori e inferiori), finiture/riestimenti interni | Strutture di fondazione, strutture di elevazione verticali e orizzontali, strutture di contenimento, chiusure verticali ed orizzontali (superiori e inferiori), finiture/riestimenti interni, impianti (HVAC, elettrici, ascensori, acqua e sistemi fognari, etc.) |

Tabella 4.1.2 Categorie di LCA secondo la *EeBGuide*. Riadattata da Del Rosario, 2020.

| FASI | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------|------------|--------------|-------------|---------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------|--------------------------|----------------------------------|---|
| PRODOTTO | | | COSTRUZIONE | | FASE D'USO | | | | | | | FINE VITA | | | BENEFICI OLTRE I CONFINI SISTEMA | |
| A1-A3 | | | A3-A4 | | B1-B7 | | | | | | | C1-C4 | | | D | |
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Approvvigionamento Materie Prime*/** | Trasporto Al Sito Di Manifattura*/** | Manifattura*/** | Trasporto In Cantiere | Costruzione | Uso | Manutenzione | Riparazione | Sostituzione* | Ristrutturazione | Uso dell'Energia In Esercizio*/** | Uso dell'Acqua In Esercizio*/** | Smontaggio/Demolizione | Trasporto | Trattamento dei Rifiuti* | Smaltimento* | Potenziale di Ri-Usa, Recupero/Riciclo* |

* Obbligatorio per la LCA semplificata
** Obbligatorio per la LCA screening e semplificata

Figura 4.1.2 Fasi e moduli del ciclo di vita da considerare nelle differenti tipologie di LCA. Rielaborata da EeBguide.

In accordo con la *EebGuide* (Wittstock et al., 2011), i sistemi LCA sono raggruppabili in tre categorie, caratterizzate da livelli crescenti di dettaglio della valutazione: *Screening LCA*, *LCA semplificata* e *LCA completa* (Tabella 4.1.2).

A ciascuna categoria di indagine LCA corrispondono specifiche finalità, una lista di indicatori essenziali, opportuni requisiti sulla qualità dei dati, moduli del ciclo di vita e unità tecnologiche da includere nella valutazione. Oltre a ciò, un aspetto rilevante da considerare è la determinazione specifica dei confini del sistema e quindi dei moduli del ciclo di vita da contemplare nell'analisi, in accordo con la EN 15978 (Figura 4.1.2).

A livello di prodotto, la EPD è regolata dalla UNI ISO 14025:2018 *Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di tipo III - Principi e procedure*, oltre che dalla EN 15804:2012+A2:2019 specifica per il settore delle costruzioni. La prima, ne descrive la procedura per lo sviluppo, la definizione e i requisiti necessari anche per la comparabilità attraverso le regole di categorie di prodotto (*Product Category Rules-PCR*). Ne deriva che una EPD fornisce informazioni ambientali quantitative basate sui risultati di una *Life Cycle Assessment*, utilizzando parametri predeterminati e informazioni ambientali aggiuntive, ove necessario. Inoltre, la EN 15804 classifica le dichiarazioni ambientali di prodotto in tre tipologie, a seconda delle fasi del ciclo di vita che esse includono: 1. EPD *from cradle to gate*; 2. EPD *from cradle to gate with option*; 3. EPD *from cradle to grave*. Secondo la EN 15804:2012+A1:2013 i moduli che dovevano essere obbligatoriamente dichiarati erano quelli che coprono le sole fasi dalla culla (A1) al cancello (A3), lasciando volontari i restanti moduli e fasi. Mentre l'attuale modifica di questa norma, la EN 15804+A2:2019, richiede che i moduli C (fine vita) e D (benefici post fine vita) siano forniti per quasi tutti i prodotti (Anderson et al., 2019).

4.1.3 Integrazione degli approcci LCA nei GBRs

Se applicate già nelle fasi iniziali del progetto, la valutazione e il miglioramento delle prestazioni ambientali durante il ciclo di vita costituiscono un'azione molto efficace per indirizzare gli edifici verso l'uso attento delle risorse e la riduzione degli impatti, dal momento che le decisioni assunte in questa fase sono rilevanti e di vasta portata (Ellis et al., 2008; Brophy et al., 2011).

La *Life Cycle Assessment*, ampiamente utilizzata da parte degli accademici da più di 20 anni (Lavagna, Palumbo, 2017), è oggi riconosciuta e accettata come metodologia idonea a misurare gli impatti ambientali degli edifici lungo l'intero ciclo di vita: dall'approvvigionamento delle materie prime per la produzione dei materiali e componenti fino alla dismissione e fine vita del manufatto edilizio. Uno studio canadese (Anand et al., 2017) documenta la forte diffusione della LCA a scala di edificio registrata nel quinquennio 2011-2016, con il numero di pubblicazioni che trattano la tematica più che raddoppiato nel periodo: da poco più di 90 articoli nell'anno 2011 a circa 250 nel 2015. In particolare, le due aree di interesse che sembrano avere prevalentemente alimentato tale produzione bibliografica sono: la relazione tra impatti legati all'uso e quelli legati alla energia incorporata e la integrazione della LCA nei sistemi di *rating* (RS) ambientale degli edifici.

Secondo Turk et al. (2018) l'uso della LCA nei RS è iniziata negli Stati Uniti nel 1992, mentre la panoramica tracciata da Nwodo et al. (Nwodo et al., 2019) sugli ambiti di applicazione del LCA dal 2011 al 2019, include la sua integrazione nei *rating system* (RS) tra le otto aree di intervento individuate, ritenendola un modo per incoraggiare la valutazione della sostenibilità degli edifici.

In letteratura, analisi approfondite della integrazione della LCA nei sistemi di valutazione della sostenibilità sono recenti e a tutt'oggi limitate. Rodriguez et al. (2017) confrontando l'implementazione della LCA in LEED, DGNB e Green Globes e la relativa conformità agli standard ISO per la LCA, hanno evidenziato importanti differenze nell'impostazione metodologica, in particolare rispetto al *target* degli obiettivi, agli ambiti di analisi e al periodo di riferimento.

Se nel DGNB l'obiettivo è la quantificazione delle prestazioni ambientali dell'edificio attraverso una LCA, prima (impatti inglobati nei materiali e nei componenti adottati nell'edificio) e durante la fase di esercizio (limitata al fabbisogno energetico), e di confrontarne i risultati rispetto a valori di *benchmark* predefiniti, in LEED lo scopo è la riduzione dei valori di impatto in categorie selezionate: di almeno il 10% per il potenziale di riscaldamento globale e del 10% per due su cinque altri impatti, rispetto a un edificio campione di riferimento. Anche l'ambito di applicazione di ciascuna delle metodologie LCA differisce nei diversi GBRs: DGNB si occupa di alcune delle fasi di produzione, uso e fine vita seguendo le disposizioni per una LCA semplificata, mentre altri, come ad esempio LEED e Active House, applicano una analisi che mira a un approccio "dalla culla alla tomba", seppur limitato a parti e componenti dell'edificio. Essendo il metodo LCA esigente in termini di dati e di calcoli, il numero di informazioni da raccogliere ed elaborare è ampio, specialmente per ciò che riguarda gli impatti inglobati dei materiali. Motivo per cui spesso una LCA completa risulta essere più spesso eseguita solo dopo che la costruzione è stata realizzata e tutte le informazioni sono note, non come efficace strumento di *feedback* in fase di progettazione (Gantner et al., 2018).

Al fine di favorire una maggiore applicabilità della metodica LCA, numerosi RS prevedono la possibilità di adottare i diversi livelli di semplificazione sopra definiti, selezionando quello prescelto in relazione ai diversi obiettivi che la valutazione intende perseguire.

In effetti, l'analisi condotta da Hollberg (2017) sulle differenti tipologie di LCA (*screening*, semplificato e completo) presenti in sette diversi sistemi di *rating* analizzati (DGNB, BNB, HQE, BREEAM, Minergie Eco, Verde e LEED) constata che nessuno di essi prevede l'esecuzione di una LCA completa, e che tutti invece privilegiano l'adozione di metodi semplificati o di *screening* (Tabella 4.1.3).

Secondo Ganassalli et al. (2017), attualmente almeno dieci GBRs hanno integrato la LCA tra i requisiti obbligatori da soddisfare, mentre quelli che non la contemplano, prescrivono

| Nome | Acronimo | Paese di origine | Tipo di LCA | Ente |
|---|----------|------------------|------------------|--|
| Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen | DGNB | Germania | LCA semplificata | German Sustainable Building Council |
| Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen | BNB | Germania | LCA semplificata | Bunderministerium des Innern, für Bau und Heimat |
| Haute Qualité Environnementale | HQE | Francia | LCA semplificata | Haute Qualité Environnementale (ASSOHQE) |
| Building Research Establishment Environmental Assessment Method | BREEAM | Inghilterra | LCA semplificata | Building Research Establishment (BRE) |
| Leadership in Energy and Environmental Design | LEED | America | LCA semplificata | U.S. Green Building Council (USGBC) |
| Minergie Eco | - | Svizzera | LCA screening | Associazione Minergie & Eco-bau |
| Verde | - | Spagna | LCA semplificata | Green Building Council España (GBCe) |

Tabella 4.1.3 Overview dei maggiori sistemi di certificazione degli edifici che si avvalgono della LCA. Rielaborata da Hollberg, 2017.

che i requisiti di sostenibilità ambientale siano soddisfatti adottando materiali dotati di certificazione *Environmental Product Declaration* (EPD).

Questa soluzione, cioè l'uso delle dichiarazioni ambientali di tipo III *from cradle to grave*, costituisce un'altra via per semplificare l'applicazione di una LCA completa. Le EPDs sono uno strumento vantaggioso a questo fine poiché forniscono dati specifici sui cicli di produzione, resi disponibili dai produttori di materiali e componenti. Ciò consente di determinare agevolmente gli impatti complessivi, essendo essi determinati dalla somma degli impatti ambientali associati ai materiali, detti *embedded impacts* (impatti inglobati) più l'impatto relativo ai consumi energetici durante la fase di uso dell'edificio (Hoxha et al. 2017).

Tuttavia, l'idoneità delle EPDs come fonti di dati della LCA in sostituzione delle banche dati è a tutt'oggi ambito di analisi e verifica nei diversi contesti, anche alla luce della recente revisione della norma EN 15804 che introduce modifiche nei moduli da includere nelle diverse fasi del ciclo di vita.

Esaminando gli effetti della sostituzione dei dati d'inventario di banca dati con gli indicatori estratti dalle EPDs, Strazza et al. (2016) concludono che le EPDs possono essere una fonte di dati LCA affidabile e persino vantaggiosa, poiché l'uso di dati specifici evita di sovrastimare i potenziali impatti ambientali.

Mentre, Lasvaux et al. (2015) considerando gli impatti ambientali di un campione di 18 materiali da costruzione, riscontrano differenze tra i risultati LCA ottenuti utilizzando le EPDs e quelli basati su due banche dati generiche. Nello specifico, i valori degli indicatori relativi al consumo di combustibili fossili (cioè ADP: potenziale di esaurimento delle risorse abiotiche; GWP: potenziale di riscaldamento globale e domanda di energia primaria) differivano fino al 25%, gli altri indicatori in percentuali ancora più elevate. Lo studio ha attribuito le discrepanze sia alle differenze nei processi di produzione in riferimento ai quali sono determinati i valori relativi ai diversi materiali, sia alla possibile diversa interpretazione delle regole comuni di prodotto (PCR) nella elaborazione delle EPDs. Mentre, la LCA condotta su tre edifici con sistemi costruttivi differenti (laterizio, cemento armato e struttura a telaio in legno) adottando database generici, ha rilevato che l'impatto ambientale complessivo è determinato dai materiali più influenti. Al di là delle diversità osservate tra valori specifici da EPD e database generici, diversi autori (Hoxha et al., 2015) concludono che l'impatto ambientale complessivo alla scala di edificio è definito da un numero limitato di materiali.

Nella pratica, rispetto alla classificazione definita dalla EN 15804, la terza tipologia di EPD *from cradle to grave*, inglobando l'intero ciclo "dalla culla alla tomba", potrebbe meglio supportare analisi LCA complete. Questo perché, se nelle EPDs fossero valutati tutti i moduli del ciclo di vita (da A1 a D) previsti dallo standard che regola la LCA alla scala di edificio, si potrebbe ricorrere

al loro uso evitando l'ausilio di *software* dedicati. L'adozione di quest'ultimo approccio, pur richiedendo elaborazioni per l'estrapolazione di indicatori LCA per le fasi oltre il cancello, che sono chiaramente basate su assunzioni connesse alla realizzazione dell'edificio (A3-A4), alla sua operatività (B1-B7) e al suo fine vita (C1-D), risulterebbe più rapido e meno laborioso.

Le dichiarazioni ambientali presenti sul mercato contengono, per lo più, informazioni sugli impatti dei materiali da costruzione e dei componenti che non sempre coprono il loro ciclo di vita completo (trasporto, utilizzo e fine della vita). In questo senso, alcuni elementi interessanti emergono dall'analisi condotta nell'ambito di una tesi di laurea (Del Rosario, 2020), sull'uso delle EPD nella valutazione LCA di un edificio per uffici. La ricerca rivela che, su un campione di circa 30 *labels*, gli indicatori relativi alle condizioni in uso del prodotto sono molto spesso assenti (solo il 30% delle EPD raccolte le include), lo stesso per la fase C1 (anch'essa inclusa solo nel 30% dei casi), mentre in generale solo il 70% delle EPD analizzate presenta un numero di fasi superiori a quelle obbligatoriamente richieste dalla norma per la tipologia *from cradle to gate*.

L'evidente conseguenza è che la possibilità di ottenere una LCA completa mediante etichette ambientali *LCA based* è ancora un traguardo lontano, seppure muova certamente nella direzione dettata dalla recente revisione della EN 15804, che stabilisce che entro 5 anni il campo di applicazione minimo di una EPD dovrà includere anche gli stadi di fine vita ed oltre (C1-C4 e D), in aggiunta alla fase di prodotto (A1-A3), che è l'unica obbligatoria nella versione attualmente vigente.

In conclusione, l'applicazione di una LCA nei diversi GRBSs garantirebbe sicuramente una trasparenza dei risultati e una valutazione ambientale completa dell'edificio (Lavagna, 2008), ma quando per alcune parti si utilizzano parti di EPD è da tenere presente che ci possono essere carenze di informazioni e non coerenza con assunzioni fatte nella LCA, pertanto il loro uso per alcune parti dell'edificio è da considerarsi meno efficace ai fini del raggiungimento di un buon livello di qualità ambientale (Ganassalli et al., 2016).

4.1.4 LEVEL(S): un quadro di riferimento comune dell'EU per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici

Level(s) è uno strumento per la valutazione della sostenibilità degli edifici durante l'intero ciclo di vita. Sviluppato dal Joint Research Center (JRC) su mandato della Direzione Generale Ambiente (DG Environment) della Commissione Europea, Level(s) è destinato ad essere applicato ad edifici sia residenziali che ad uso ufficio.

La Commissione Europea ha avviato i lavori di definizione dello strumento in versione *beta* nell'autunno 2017, con l'intento di definire un "linguaggio comune" e non uno schema di certificazione indipendente o parametri di riferimento relativi alle prestazioni degli edifici (JRC, 2017). Nell'aprile 2018 è stata ufficialmente aperta la fase di test biennale, coinvolgendo circa 140 progetti pilota in 21 Paesi europei, per raccogliere *feedback* da parte dei differenti *stakeholders* coinvolti nella *supply chain* edile e immobiliare - dagli investitori, ai costruttori, ai progettisti e ai produttori - e di pubblicarne la versione finale nella primavera del 2020.

Level(s) non si struttura secondo requisiti obbligatori da raggiungere, ma sul progressivo grado di approfondimento dell'analisi da parte degli utilizzatori, dai neofiti ai più esperti. Considerando l'aumento della precisione e dell'affidabilità della valutazione e la capacità professionale necessaria per condurre l'analisi, sono stati definiti tre target così distinti:

- livello di valutazione comune delle prestazioni [Level(s) (1)];

- livello di valutazione comparativa delle prestazioni [Level(s) (2)];
- livello di valutazione ottimizzata delle prestazioni [Level(s) (3)].

La valutazione dell'edificio viene condotta sulla base dei sei seguenti macro obiettivi, e relativi indicatori: 1. emissioni di gas serra lungo il ciclo di vita dell'edificio, 2. cicli di vita dei materiali circolari ed efficienti nell'uso delle risorse, 3. uso efficiente delle risorse idriche, 4. spazi salubri e confortevoli, 5. adattamento e resilienza al cambiamento climatico, 6. ottimizzazione del valore e del costo del ciclo di vita (Tabella 4.1.5).

Il secondo macro obiettivo "riduzione degli impatti ambientali attraverso l'ottimizzazione delle risorse e la riduzione degli sprechi durante il ciclo di vita di un edificio", comprende due strumenti di supporto all'ottenimento di una analisi del ciclo di vita alle diverse scale: la distinta di materiali (2.1 *Building Bill of Materials-BoM*) e la LCA completa (2.4 LCA dalla culla alla culla *cradle to cradle*).

Il primo consiste nel computare i flussi di materiali presenti nell'edificio: passaggio fondamentale e in linea con la raccolta di dati di Eurostat (European Commission, 2019) per la contabilizzazione dei flussi di materiali a livello europeo.

Per la compilazione della distinta occorre:

1. scomporre l'edificio nei principali elementi tecnici (strutture di fondazioni, pareti perimetrali verticali, etc.) che costituiscono almeno il 99% della massa dell'edificio;
2. individuare le tipologie di materiali di cui sono costituiti al fine di compilare un inventario sulle quantità;
3. raggruppare i materiali in base alle specifiche tecniche;
4. aggregare i materiali in modo da definire la massa totale delle quattro principali categorie definite da Eurostat in: materiali metallici; materiali minerali non metallici; materiali energetici fossili; materiali basati sulla biomassa.



Figura 4.1.3 Livelli di valutazione delle prestazioni.

| Area tematica: Prestazioni ambientali del ciclo di vita | |
|---|--|
| Macro-Obiettivo | Indicatore |
| 1. Emissioni di gas serra (GHG) lungo il ciclo di vita di un edificio | 1.1. Prestazione energetica nella fase d'uso [kWh/m ² /anno] |
| | 1.2. Potenziale di riscaldamento globale del ciclo di vita [CO ₂ eq./m ² /anno] |
| 2. Cicli di vita dei materiali circolari ed efficienti nell'uso delle risorse | 2.1. Strumento per il ciclo di vita: distinta dei materiali di costruzione [kg] |
| | 2.2. Strumenti per il ciclo di vita: Scenari riguardanti la vita utile, l'adattabilità e lo smantellamento |
| | 2.3. Rifiuti e materiali di costruzione e demolizione [kg/m ²] |
| | 2.4. Strumento per il ciclo di vita: Valutazione del ciclo di vita (LCA) dalla culla alla culla [Impatto/m ² /anno] |
| 3. Utilizzo efficiente delle risorse idriche | 3.1. Consumo idrico nella fase di utilizzo [m ³ /occupante/anno] |
| Salute e benessere | |
| 4. Spazi salubri e confortevoli | 4.1. Qualità dell'aria interna |
| | 4.2. Tempo al di fuori dell'intervallo di comfort termico |
| | <i>Potenziati aspetti futuri</i> |
| | 4.3. Illuminazione e comfort visivo 4.4. Acustica e protezione dal rumore |
| Costo, valore e rischio | |
| 5. Adattamento e resilienza al cambiamento climatico | 5.1. Strumenti per il ciclo di vita: Scenari riguardanti le condizioni climatiche future previste |
| | <i>Potenziati aspetti futuri</i> |
| | 5.2. Maggiore rischio di eventi atmosferici estremi 5.3. Maggiore rischio di inondazioni |
| 6. Ottimizzazione del valore e del costo del ciclo di vita | 6.1. Costi del ciclo di vita [€/m ² /anno] |
| | 6.2. Creazione di valore e fattori di rischio |

Tabella 4.1.4. Macro obiettivi e indicatori contenuti in Level(s).

Tabella 4.1.5.a LCA nei diversi livelli di valutazione previsti da Level(s).

| | L1 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE COMUNE | L2 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE COMPARATIVA | L3 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE OTTIMIZZATA |
|---|--|--|---|
| DESTINATARI FINALI | Non esperti LCA che cercano di capire e migliorare le prestazioni ambientali dell'edificio | Professionisti che desiderano rendere pubbliche le prestazioni ambientali degli edifici e confrontarsi con altri edifici | Professionisti che intendono utilizzare la LCA nella fase iniziale del progetto come strumento di supporto decisionale per migliorare la sostenibilità dell'edificio |
| PARTI E ELEMENTI DELL'EDIFICIO | Elementi costruttivi dell'involucro e strutture, escludendo le opere esterne | | |
| DIMENSIONE TEMPORALE PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI | 60 anni | | |
| NORME DI RIFERIMENTO | ISO 14040/44, EN 15978 | | |
| FASI DEL CICLO DI VITA | <p>Dovrebbero essere esaminate tutte le fasi del ciclo di vita, a meno che non vengano selezionate opzioni semplificate basate su un ciclo di vita incompleto.</p> <p>Le opzioni semplificate suggerite sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> OPZIONE 1: Fase del prodotto (A1-A3), Fase di utilizzo (B4-B5, B6) OPZIONE 2: Fase del prodotto (A1-A3), Uso dell'energia operativa (B6), Fine vita (C3-C4), Benefici e oneri oltre i confini del sistema (D) | | Ciclo di vita completo |
| SCENARI E FINE VITA | <p>Checklist degli aspetti progettuali più importanti che possono essere presi in considerazione e se/come vengono affrontati</p> | <p>Agli aspetti del progetto che sono importanti da considerare viene attribuita una ponderazione e i punteggi ottenuti dal progetto vengono poi sommati per ottenere una performance complessiva che può essere computata</p> | <p>L'analisi delle prestazioni ambientali dei progetti utilizzando altri indicatori di Level(s), come il 1.2 (GWP nel ciclo di vita) o il 2.4 (LCA dalla culla alla culla), in modo da poterli valutare, confrontare e rendicontare</p> |
| INSIEMI DI DATI E SOFTWARE PER LIFE CYCLE INVENTORY E LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT | <p>Come requisito minimo, è necessario utilizzare dati generici o standard per calcolare l'impatto relativo alle parti e agli elementi dell'edificio e ai processi del ciclo di vita. È possibile reperire tali dati nella letteratura tecnica e/o utilizzando strumenti software e banche dati semplici e liberamente accessibili.</p> | <p>I dati per i processi <i>foreground</i> devono fare riferimento a dati specifici. I dati di <i>background</i> in devono essere rappresentativi del contesto nazionale/regionale analizzato. I dati provenienti da fonti primarie e secondarie devono essere convalidati e certificati da terzi.</p> | |
| REQUISITI IN MATERIA DI DATI | <p>L'obiettivo principale di questa sezione è la trasparenza dei dati. Per motivi di trasparenza è necessario calcolare un indice della qualità dei dati.</p> | <p>È necessario calcolare un indice della qualità dei dati. La qualità complessiva dei dati deve ottenere un punteggio superiore a 2. Per ragioni di trasparenza devono essere comunicate anche le fonti dei dati.</p> | |

Tabella 4.1.5.b LCA nei diversi livelli di valutazione previsti da Level(s).

| | L1 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE COMUNE | L2 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE COMPARATIVA | L3 LIVELLO DELLA VALUTAZIONE OTTIMIZZATA |
|--|--|--|--|
| INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E RIESAME CRITICO | <p>I risultati devono essere interpretati in modo critico attraverso un'analisi della sensibilità al fine di comprendere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • i punti critici ambientali, i possibili compromessi tra le fasi del ciclo di vita e gli ambiti di miglioramento; • l'influenza dei dati sui risultati; • le lacune dei dati, la solidità delle ipotesi e le limitazioni. | <p>I risultati devono essere interpretati in modo critico attraverso un'analisi della sensibilità al fine di comprendere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • i punti critici ambientali, i possibili compromessi tra le fasi del ciclo di vita e gli ambiti di miglioramento; • l'influenza dei dati sui risultati; • le lacune dei dati, la solidità delle ipotesi e le limitazioni. <p>È necessario redigere conclusioni riassuntive e raccomandazioni. Occorre inoltre un riesame critico secondo quanto previsto dalla norma ISO 14071 al fine di verificare la coerenza dell'analisi rispetto ai requisiti stabiliti dalle norme ISO 14040/44 e ISO 14067.</p> | <p>I risultati devono essere interpretati in modo critico attraverso un'analisi della sensibilità al fine di comprendere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • i punti critici ambientali, i possibili compromessi tra le fasi del ciclo di vita e gli ambiti di miglioramento; • l'influenza dei dati sui risultati; • le lacune dei dati, la solidità delle ipotesi e le limitazioni. <p>È necessario redigere conclusioni riassuntive e raccomandazioni. Occorre inoltre un riesame critico secondo quanto previsto dalla norma ISO 14071 al fine di verificare la coerenza dell'analisi rispetto ai requisiti stabiliti dalle norme ISO 14040/44 e ISO 14067.</p> |
| UNITÀ DI RIFERIMENTO | | 1 m ² di superficie interna utile | |

L'indicatore 2.4 è invece uno strumento essenziale per consentire il raggiungimento di una LCA completa, se spinto fino al livello di valutazione dell'ottimizzazione (Livello 3).

In tabella 4.1.5 è presentata una panoramica dei tre livelli di valutazione, classificati in base a: target degli utilizzatori finali, elementi costruttivi da includere nell'analisi, *service life* dell'edificio, normative di riferimento, fasi del ciclo di vita, scenari e fine vita, dati e *software* di riferimento, qualità dei dati, interpretazione dei risultati e unità funzionale di riferimento. L'approccio introdotto da Level(s) di incoraggiare una valutazione LCA completa "dalla culla alla culla" può agevolmente raggiungere la completezza, se si possiedono i *tools*, le competenze e le conoscenze specialistiche necessarie.

L'originalità del sistema risiede nell'offrire la possibilità di avviare un percorso volto all'uso di tali strumenti, supportando anche i meno esperti.

Un confronto recentemente realizzato tra i sistemi di *rating* di sostenibilità più utilizzati in Europa e il *framework* europeo Level(s) rileva che il sistema tedesco DGNB è il sistema di *rating* che si allinea maggiormente con Level(s) (Cordero et al., 2019), tanto da essere l'unico ad aver incluso nella versione 2018 del protocollo una sezione in cui segnala le sue sinergie con il quadro europeo.

A differenza degli altri GBRs, il *framework* europeo al momento non prevede soglie di punteggio come LEED o livelli di *benchmark* come DGNB e Active House, quindi in questo testo un'analisi comparativa sulla totalità dei criteri adottati tra sistemi risulterebbe complessa e non pregnante.

Ponendo piuttosto l'attenzione sugli aspetti metodologici inerenti la LCA che caratterizzano tali sistemi, la recente rassegna condotta da Cordero et al. (2019) sul confronto tra i più noti sistemi di certificazione *green* degli edifici europei con gli indicatori contemplati nel quadro

Tabella 4.1.6 *Service life* adottata nei differenti GBRs.

| Tipologia | Vita utile | Versione | Anno Pubblicazione |
|--------------|------------|--------------|--------------------|
| Level(s) | 60 anni | v.1.0 | 2017 |
| DGNB | 50 anni | Version 2018 | 2018 |
| Active House | 50 anni | - | 2002 |
| LEED | 60 anni | v.4.1 | 2019 |

di riferimento Level(s) mostra similitudini tra DGNB e HQE, e all'opposto maggiori differenze tra BREEAM e LEED. Tali discrepanze secondo gli autori causano diverse difficoltà nel creare sinergie tra gli esistenti GBRs e le linee di indirizzo espresse da Level(s).

Indagando meglio i principi metodologici per condurre l'analisi del ciclo di vita alla scala di edificio previsti rispettivamente da Level(s) e da DGNB, e più precisamente: a. la dimensione temporale per la valutazione delle prestazioni dell'edificio, b. confini del sistema, c. indicatori LCA richiesti e categorie LCA contemplate; emerge quanto segue.

Il periodo di vita utile dell'edificio stabilito da Level(s), similmente a Leed v.4 (Rodriguez et al. 2017) è di 60 anni, mentre in DGNB e in Active House è di 50 anni (Tabella 4.1.7).

Secondo la norma EN 15978, che regola il metodo di calcolo da applicare alla scala di edificio, quando il periodo di riferimento dello studio è più lungo della vita utile designata, devono essere sviluppati scenari per l'ammodernamento o la demolizione e la nuova costruzione dell'edificio, tali da consentire un prolungamento della vita utile, generando quindi ulteriori impatti. È di conseguenza esplicito che una comparabilità dei valori di impatto tra valutazioni condotte su *range* temporali differenti rende i risultati non immediatamente confrontabili, richiedendo adeguamenti e/o estensioni delle operazioni di calcolo.

Rispetto agli stadi del ciclo di vita e ai processi da includere nella valutazione (confini del sistema) in accordo con il succitato standard europeo, pur essendo suggerito e incoraggiato un approccio "dalla culla alla culla" da parte del *framework* europeo, entrambi i sistemi prevedono l'uso di una LCA semplificata che include (Tabella 4.1.8):

- produzione dei materiali (A1-A3),
- consumo energetico operativo (B6),
- trattamento dei rifiuti (C3) e smaltimento (C4),

| Tipologia | Level(s) | | | DGNB | |
|------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------|--|
| | Livello 1 | Livello 2 | Livello 3 | | |
| Tipologia LCA | Semplificata | Semplificata | Completa | Semplificata | Completa |
| Fasi del ciclo di vita | A1-A3, B4, B6 (opzione 1) | | A1-A3, A4-A5, B1-B7, C1-C4, D | A1-A3, B4, B6, C3-C4, D | A1-A3* A4-A5 B1-B7 C1-C4 D |
| | A1-A3, B6, C3-C4, D (opzione 2) | | | | |

* Criteri di cut-off per le tre categorie di materiali:

1. I materiali che costituiscono più dell'1% della massa totale dell'edificio possono essere ignorati se non costituiscono più del 5% della massa dell'intero edificio.
2. Le plastiche e i prodotti realizzati con materie prime rinnovabili: il fabbisogno totale di energia primaria (PEtot) del materiale/prodotti che supera il 2% del fabbisogno totale di energia primaria dell'edificio (solo costruzione, compresa la produzione, la manutenzione e la fine del ciclo di vita) può essere ignorato se non costituiscono più del 5% della massa dell'intero edificio.
3. Rivestimenti: il potenziale di formazione fotochimica di ozono (POCP) che supera il 2% del potenziale di formazione fotochimica di ozono può essere ignorato se non costituiscono più del 5% della massa dell'intero edificio.

Tabella 4.1.7 Tipologie di LCA contemplate nel *framework* Level(s) e in DGNB.

-potenziale di riutilizzo, recupero e riciclaggio (D), oltre a indicatori specifici e parziali rispetto a B2, B5 E B4.

Ai fini della comparabilità tra LCA di edifici la scelta dei moduli del ciclo di vita da includere nei confini del sistema è determinante. A tal proposito, Del Rosario (2020) ha confrontato l'approccio adottato da Level(s) con DGNB, facendo emergere sostanziali differenze tra essi. Gli indicatori di impatti previsti sono invece allineati e in accordo agli standard di riferimento (Tabella 4.1.9).

| Periodo di riferimento dello studio | 60 anni | 50 anni |
|-------------------------------------|---|-------------------------|
| Fasi del ciclo di vita | Livello 1 e 2: è prevista una LCA semplificata Opzioni: <ul style="list-style-type: none"> ● A1-A3, B4, B5, B6 ● A1-A3, B6, C3-C4, D Livello 3: LCA completa | A1-A3, B4, B6, C3-C4, D |
| GWP | X | X |
| ODP | X | X |
| AP | X | X |
| EP | X | X |
| POCP | X | X |
| ADPE | X | X |
| ADPF | X | |
| PERT | | X |
| PENR | | X |
| PERE/PERT | | X |
| FW | | X |

Tabella 4.1.8 Confronto tra DGNB e Level(s): principali differenze nella adozione della metodologia LCA.

4.1.5 Suggerimenti e sviluppi futuri

La *Life Cycle Assessment* è una valida e appropriata metodologia per valutare le pressioni ambientali che l'ambiente edificato esercita. Ampiamente riconosciuta e integrata nelle direttive europee e in ambito accademico, sta trovando consenso anche sul mercato, sia come crescente diffusione delle EPD da parte dei produttori, sia come integrazione nelle certificazioni di sostenibilità degli edifici.

Benché la LCA e le etichette *LCA based* siano ampiamente riconosciute e incluse nella gran parte dei GBRs, di fatto il peso degli indicatori derivanti da una valutazione del ciclo di vita rispetto alla totalità dei criteri varia molto da un sistema a un altro, risultando pertanto difficilmente confrontabile.

Gli intenti comunitari sono chiaramente incentrati su questioni orientative e di indirizzo, quelli accademici sugli approcci metodologici, di ricerca e di appropriatezza delle analisi, mentre il mercato per la semplificazione e la praticità d'uso. La volontà di definire un "linguaggio comune" e riconoscibile dalle parti interessate e nei diversi contesti territoriali è l'obiettivo che accomuna le visioni di tutti.

Il lancio di Level(s) da parte della Commissione Europea attraverso la fase di sperimentazione su casi pilota ha avviato un importante e unico percorso di confronto, sia a livello dei principali organismi di gestione dei *rating* esistenti (LEED, BREEAM, DGNB, HQE, etc.), sia come *stakeholder* coinvolti. I circa 140 progetti pilota appartenenti a 21 Paesi europei hanno riunito più profili e figure appartenenti alla filiera delle costruzioni: imprese, professionisti, produttori, accademici e amministrazioni.

La centralità nell'approccio al ciclo di vita da parte del quadro europeo ha oltretutto accentuato l'interesse verso una maggiore integrazione del metodo LCA e delle etichette LCA *based* nei quattro sistemi di certificazione di sostenibilità degli edifici più diffusi e usati: il tedesco DGNB, l'inglese BREEAM, il francese HQE e l'americano LEED.

Come si evince dalle parti di testo che precedono e in accordo con la letteratura, pur constando che DGNB e HQE hanno un approccio LCA più simile a Level(s), mentre BREEAM e LEED presentano una struttura molto diversa (Sánchez Cordero et al., 2020), una loro confrontabilità trova robustezza analitica solo se condotta sui singoli criteri su cui si strutturano, e quindi sui parametri e le metodiche che li determinano, piuttosto che sui macro ambiti. La comparazione sulle regole e i principi che regolano l'applicazione della LCA sta avviando un interessante dibattito tecnico-scientifico, interessando accademici e mondo industriale.

Le questioni centrali su cui occorre lavorare e meglio investigare riguardano principalmente due ambiti: le fonti dei dati che alimentano le LCA, la definizione di soglie di *benchmark* degli esiti LCA volte a indirizzare e supportare le azioni progettuali in tutte le fasi, anche da quelle iniziali.

Il primo punto in realtà è alimentato dal crescente interesse e dalla recente necessità, specie di Paesi come l'Inghilterra il cui livello di maturità d'uso è attualmente tra i più alti, di inglobare le analisi del ciclo di vita nei sistemi di progettazione integrata con *tool* come il *Building Information Modeling* (BIM). Ne conseguono indagini e sperimentazione sull'uso e gestione di banche dati generiche piuttosto che EPD specifiche di prodotto, oltre che sulle differenti modalità tecnico-operative.

L'altro, invece, dalla consapevolezza che l'adozione della metodica LCA già dalle prime fasi di progettazione favorirebbe una riduzione dell'uso delle risorse e degli impatti ambientali associati al settore edile lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio (Hollberg et al., 2016; Röck et al., 2018).

Una recente corrente di pensiero trova nella definizione di soglie di valori *target* (*benchmark*), definite come medie aritmetiche dei risultati LCA di progetti ed edifici realizzati, la possibilità di fornire informazioni e indicazioni sugli impatti ambientali già nelle fasi iniziali del progetto, indirizzando così la progettazione verso un percorso più orientato ai temi della sostenibilità nel ciclo di vita (Schlegl et al., 2019). Interessanti spunti sono identificati dagli studi effettuati in ambito accademico francese (Lasvaux et al., 2017), svizzero (Frischknecht et al., 2019) e tedesco (Schlegl et al., 2019). In quest'ultimo caso, l'obiettivo della ricerca in atto, con il supporto tecnico dell'associazione DGNB e attraverso fondi di finanziamento pubblici, mira a definire soglie di *benchmark* LCA di edifici attraverso la mappatura dei certificati ottenuti con il sistema DGNB che certifica più di 200 edifici all'anno.

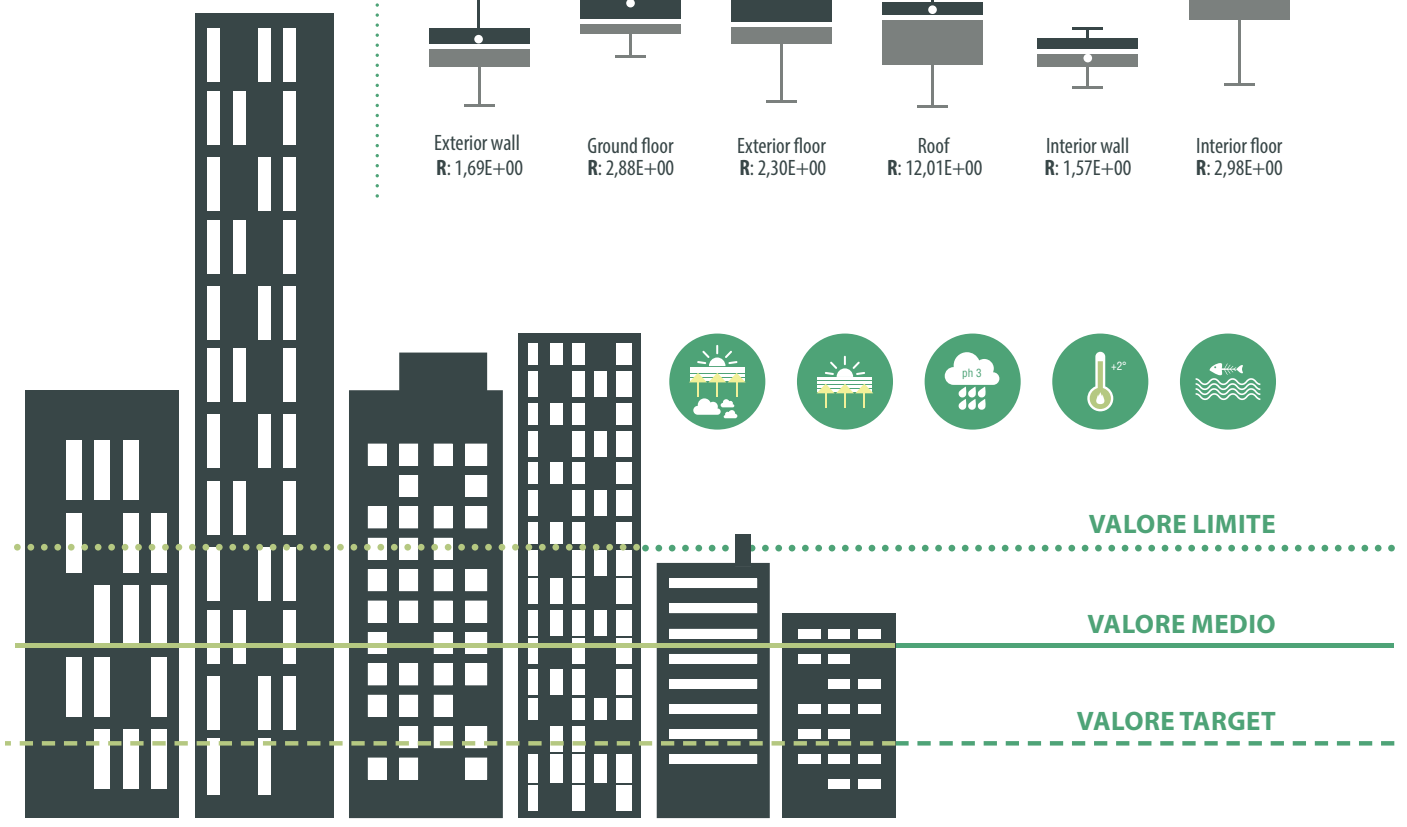
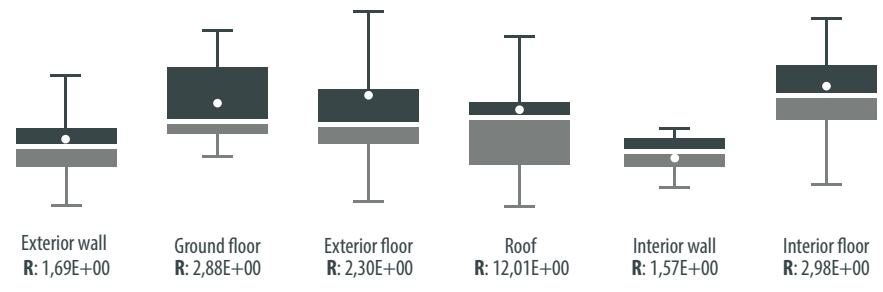
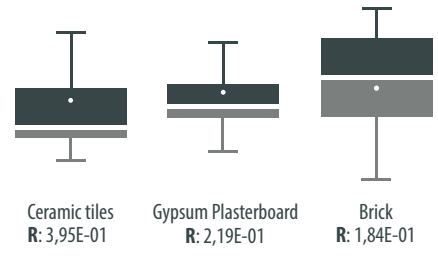
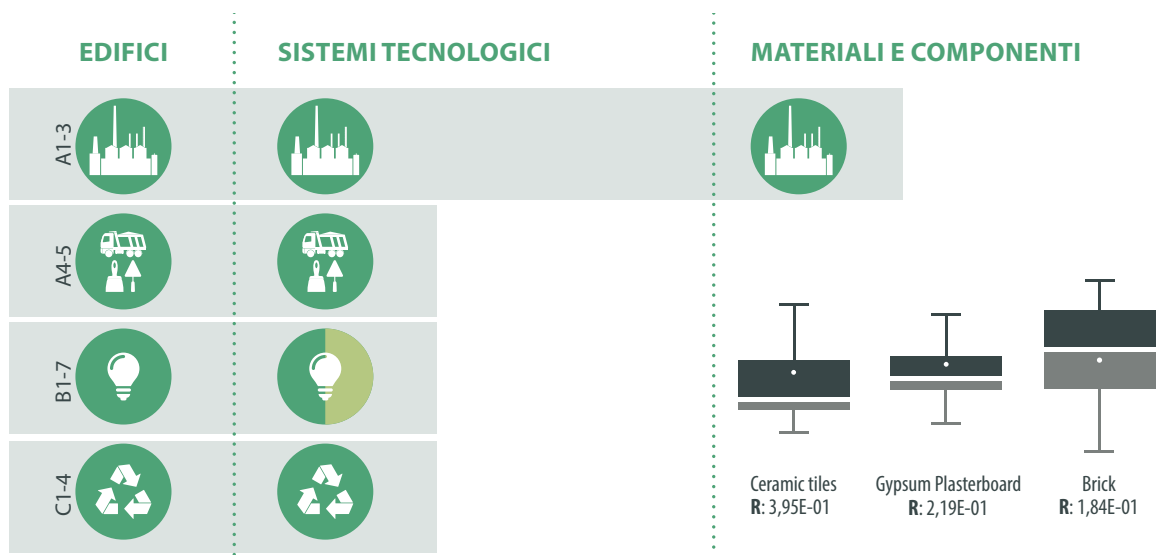
Bibliografia

- Anderson J., Rønning A., Moncaster A., 2019. "The Reporting of End of Life and Module D Data and Scenarios in EPD for Building level Life Cycle Assessment", *Sustainable Built Environment Conference 2019* (SBE19 Graz). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323 (2019) 012051. IOP Publishing.
- Anand C.K., Amor M., 2017. "Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67(C), pp. 408-416.

- Blengini G.A., Di Carlo T., 2010. "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings", *Energy and Buildings*, vol. 42(6), pp. 869-880.
- Bernardi E., Carlucci S., Cornaro C., Bohne R.A., 2017. "An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings", *Sustainability*, vol. 9(7), 1226.
- BPIE Report, 2020. Vitali Roscini A., Rapf O., Kockat J., *On the way to a CLIMATE-NEUTRAL EUROPE. Contributions from the building sector to a strengthened 2030 climate target.*
- Brophy V., Lewis O.J., 2011. *A Green Vitruvius Principles and Practice of Sustainable Architectural Design*, Routledge: London, UK.
- Buyle M., Audenaert A., Braet J., Debacker W., 2015. "Towards a more sustainable building stock: optimizing a Flemish dwelling using a life cycle approach", *Buildings*, vol. 5(2), pp. 424-448.
- Buyle M., Galle W., Debacker W., Audenaert A., 2019. "Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context", *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 141-156.
- Cordero A., Melgar S., Andujar J., 2019. "Green Building Rating Systems and the New Framework Level(s): A Critical Review of Sustainability Certification within Europe", *Energies*, vol. 13(1).
- Del Rosario Peguero P.M., 2020. *Environmental profile of an Italian building's envelope applying EPD comparing different sustainability building rating systems: Active House, DGNB, and Level(s)*, Master Thesis submitted to the Institute of Sustainability in Civil Engineering. Examiners: Prof. Dr.-Ing. Marzia Traverso and Dr.-Arch. Elisabetta Palumbo.
- Dodd N., Cordella M., Traverso M., Donatello S., 2017. *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, Parts 1 and 2: Introduction to Level(s) and how it works (Draft Beta v1.0)*, Joint Research Centre.
- Ellis P.G., Torcellini P.A., Crawley D.B., 2008. "Energy Design Plugin. An Energyplus Plugin for Sketchup", *Third National Conference of IBPSA-USA*, Berkeley, California, pp. 238–245 .
- European Commission, 2011. *Roadmap to a Resource Efficient Europe*. COM(2011)571.
- European Commission, 2014. *On Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector*. COM(2014) 445.
- European Commission, 2016. *Commission Recommendation (EU) 2016/1318 on Guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings*. C/2016/4392.
- European Commission, 2017. *Raw Materials Information System (RMIS): Towards v2.0 - An Interim Progress Report & Roadmap*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- European Commission, 2017. *Build Up - Introducing Level(s): a common language for sustainable buildings*. Available online: <https://www.buildup.eu/en/node/53669>.
- European Commission, 2019. *Commission recommendation on building modernization*. C(2019) 4135 final. Official Journal of the European Union, Brussels.
- European Commission , 2019. *Material flow accounts and resource productivity - Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Material_flow_accounts_and_resource_productivity#Consumption_by_material_category.
- European Commission, 2019. *Commission Recommendation (EU) 2019/786 on building renovation* (notified under document C(2019) 3352).
- Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency.
- European Commission, 2019. *LEVEL(S) Taking Action on the Total Impact of the Construction Sector*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

- Frischknecht R., Balouktsi M., Lützkendorf T. et al., 2019. *Environmental benchmarks for buildings: needs, challenges and solutions—71st LCA forum*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 18 June 2019.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., 2016. "LCA Benchmarks in building's environmental certification systems", *41st IAHS World Congress Sustainability and Innovation for the Future*, 13-16th September 2016 Albufeira, Algarve, Portugal.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., 2017. "Benchmark LCA e uso di EPD nei Green Building Rating System", *Atti del XI Convegno della Rete Italiana LCA Resource Efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking*, Siena, 22-23 giugno 2017.
- Gantner J., Both Von P., Rexroth K., 2018. "Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess: BIM-basierte entwurfsbegleitende Ökobilanz in frühen Phasen einer Integralen Gebäudeplanung", *Bauphysik*, vol. 40(5), pp. 286-297.
- Gervasio H., Dimova S., 2018. *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*, EUR 29123 EN, Publications Office of the European Union.
- Higham A.P., Fortune C., Boothman J.C., 2016. "Sustainability and investment appraisal for housing regeneration projects", *Structural Survey*, vol. 34(2), pp. 150-167.
- Himpe E., Trappers L., Debacker W., Delghust M., Laverge J., Janssens A., Moens J., Van Holm M., 2013. "Life cycle energy analysis of a zero-energy house", *Building Research & Information*, vol. 41(4), pp. 435-449.
- Hollberg A., Ruth J., 2016. "LCA in architectural design-a parametric approach", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, pp. 943-960.
- Hollberg A., 2017. *Parametric Life Cycle Assessment: Introducing a time-efficient method for environmental building design optimization*, vol. 4, Bauhaus-Universitätsverlag Weimar; 1 edition (3 April 2017).
- Hoxha E., Habert G., Lasvaux S., Chevalier J., Le Roy R., 2017. "Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability", *Journal of Cleaner Production*, vol. 144, pp. 33-47.
- Hu M., Cunningham P., Gilloran S., 2017. "Sustainable design rating system comparison using a life-cycle methodology", *Building and Environment*, vol. 126, pp. 410-421.
- Joint Research Centre, 2017. *Level(s) - A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings*. https://susproc.jrc.ec.europa.eu/Efficient_Buildings/docs/170816_Levels_EU_framework_of_building_indicators.pdf.
- Lavagna M., 2008. *Life Cycle Assessment in edilizia: progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano.
- Lavagna M., Palumbo E., 2017. "Obiettivi, metodi e strumenti operative per la valutazione della sostenibilità ambientale", in: Antonini E., Tucci F. (eds), *Architettura, Città e Territorio verso la Green Economy Architecture*, Edizioni Ambiente, Milano, pp. 152-163.
- Lasvaux S., Habert G., Peuportier B., Chevalier J., 2015. "Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, pp. 1473-1490.
- Mateus R., Braganca L., 2011. "Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT-H", *Building and Environment*, vol. 46(10), pp. 1962-1971.
- Olakitan Atanda J., 2019. "Developing a social sustainability assessment framework", *Sustainable Cities & Societies*, vol. 44, pp. 237-252.
- Nwodo M.N., Anumba C.J., 2019. "A review of life cycle assessment of buildings using a

- systematic approach", *Building and Environment*, vol. 162, 106290.
- Palumbo E., Politi S., 2018. "Improving building envelope efficiency: interaction between embedded energy and operational energy", *Techne – Matter is Design*. vol. 16, pp. 247-257.
- Politi S., Antonini E., 2017. "An expeditious method for comparing sustainable rating systems for residential buildings", *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 41-50.
- Röck M., Hollberg A., Habert G., Passer A., 2018. "LCA and BIM: Integrated assessment and visualization of building elements' embodied impacts for design guidance in early stages", *Procedia CIRP* 69, pp. 218-223.
- Rodriguez B., Simonen K., 2017. *Comparison of methodologies for Whole Building Life Cycle Assessment: A review*. http://www.carbonleadershipforum.org/wp-content/uploads/2018/01/LCA-Method-Comparison_04.06.2017.pdf.
- Sánchez Cordero A., Gómez Melgar S., Andújar Márquez J.M., 2020. "Green Building Rating Systems and the New Framework Level(s): A Critical Review of Sustainability Certification within Europe", *Energies*, vol. 13, 66.
- Schlegl F., Honold C., Leistner S., Albrecht S., Roth D., Haase W., Leistner P., Binz H., 2019. "Integration of LCA in the Planning Phases of Adaptive Buildings", *Sustainability*, vol. 11, 4299.
- Schlegl F., Gantner J., Traunspurger R., Albrecht S., Leistner P., 2019. "LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases", *Energy & Buildings*, vol. 194, pp. 342-350
- Strazza C., Del Borghi A., Magrassi F., Gallo M., 2016. "Using environmental product declaration as source of data for life cycle assessment: a case study", *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 333-342.
- Turk S., Quintana A.S.N.S., Zhang X., 2018. "Life-cycle analysis as an indicator for impact assessment in sustainable building certification systems: the case of Swedish building market", *Energy Procedia*, vol. 153, pp. 414-419.
- Varma C.R.S., Palaniappan S., 2019. "Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia", *Habitat Int.*, 89, 101989.
- Velenturf A.P.M., Archer S.A., Gomes H.I., Christgen B., Lag-Brotons A.J., Purnell P., 2019. "Circular economy and the matter of integrated resources", *Science of the Total Environment*, vol. 689, pp. 963–969.
- Wittstock B., Gantner J., Lenz K., Saunders T., Anderson J., Carter C., Gyetvai Z., Kreißig J., Braune A., Lasvaux S., et al., 2011. *EeBGuide Guidance Document. Part B: Buildings. Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*. Available online: http://www.eebguide.eu/?page_id=704.
- Tupenaite L., Lill I., Geipele I., Naimaviciene J., 2017. "Ranking of Sustainability Indicators for Assessment of the New Housing Development Projects: Case of the Baltic States", *Resources*, vol. 6(4), 55.
- Zhang X., Shen L., Wu Y., 2011. "Green strategy for gaining competitive advantage in housing development: A China study", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 157-167.



4.2 L'importanza di benchmark LCA in Italia per il settore delle costruzioni

A livello globale il settore delle costruzioni è uno dei principali responsabili dei fattori di impatto ambientale. In Europa, esso produce circa il 42% delle emissioni ambientali (di cui circa il 35% possono classificarsi come emissioni di gas serra in atmosfera), mentre circa il 28% dell'energia primaria totale viene consumato dal settore residenziale.

Per cercare di contenere consumi ed emissioni dell'azione antropica nel settore edilizio, in Europa vengono promosse nuove leggi, *target* ambientali a lungo periodo e protocolli ambientali volontari, il cui obiettivo comune è la riduzione degli impatti causati dagli edifici durante l'intero ciclo di vita. Ne sono esempio la *EU strategy 2030*, che fissa tre obiettivi principali per la riduzione delle emissioni legate ai consumi energetici (1-ridurre di almeno il 40% delle emissioni di gas a effetto serra rispetto al 1990; 2-raggiungere la quota del 32% di energia rinnovabile nel consumo finale; 3-migliorare almeno del 32.5% l'efficienza energetica) e la nuova Direttiva Europea 2018/844, la quale cerca di migliorare le misure del *Clean Energy for all Europeans* promuovendo strategie a lungo termine efficaci per la decarbonizzazione del patrimonio costruito.

In questo contesto diviene sempre più importante l'applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) per la valutazione e la quantificazione degli impatti ambientali prodotti dal sistema edificio durante il ciclo di vita. Tuttavia, ad oggi questa metodologia non è affiancata da valori di riferimento di impatto ambientale¹ che siano in grado di essere utilizzati da esperti e professionisti per elaborare nuove strategie e politiche di sostenibilità. I professionisti prendono decisioni progettuali tenendo in considerazione molteplici criteri e obiettivi, al fine di trarre differenti aspetti della sostenibilità ambientale (Marsh, 2016); questi possono provenire da richieste della committenza, regolamenti legislativi o standard costruttivi ed essere quantitativi e misurabili (come la trasmittanza termica dell'involucro) o qualitativi (come la promozione del benessere sociale sostenibile). L'analisi comparativa tra valori di sostenibilità ambientale presi a riferimento o il confronto tra differenti tecnologie costruttive e pratiche edilizie è un contributo affidabile al processo decisionale (Russel-Smith et al., 2015), poiché aiuta gli *stakeholder* del settore edilizio nella valutazione obiettiva dell'efficienza ambientale di un edificio; in aggiunta, il progressivo miglioramento stimolato dal confronto tra sistemi virtuosi comporta una graduale riduzione degli impatti ambientali.

4.2.1 Tipologie di benchmark nel settore delle costruzioni

Attualmente alcuni Paesi EU, ed extra EU, finanziano l'analisi di differenti metodi di *benchmarking* per la scelta di un valore o un *range* di valori di riferimento basati sulla metodologia LCA e le sue categorie di impatto ambientale. Tra questi troviamo la Francia (Lasvaux et al, 2017), la Svezia (Boverket, 2018) la Norvegia (Statsbygg, 2014) e la Danimarca (Mortensen et al., 2018).

¹ Ganassali S., 2019. *Measure and Limits. Critical analysis and definition of LCA-based benchmarks in the construction sector*, Tesi di dottorato, supervisors: Prof. Andrea Campioli, Prof. Monica Lavagna, Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering, XXXI cycle, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.

Sara Ganassali

Architetto, PhD presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team.

E-mail: sara.ganassali@polimi.it

A livello internazionale è attivo il progetto IEA EBC Annex 72 e lo standard ISO/CD 21678, i quali cercano di sviluppare una classificazione dei valori medi di sostenibilità riconosciuta a livello scientifico, con specifici parametri di riferimento e una terminologia armonizzata per la definizione di valori di sostenibilità per edifici. A questi si affiancano studi recenti che analizzano le prestazioni energetiche e ambientali del parco immobiliare europeo, stimando valori medi che possano essere utilizzati come *benchmark* ambientali/LCA di riferimento per uno specifico contesto (Ganassali, 2019; Gervasio & Dimova, 2018; Lavagna et al., 2018). *Benchmark* basati sull'approccio *life-cycle* possono essere ottenuti da un approccio *target-best practice* (Brejnsrod et al., 2017; Zimmermann et al., 2005), fissando obiettivi virtuosi da poter raggiungere con precise tecnologie, oppure mediante analisi statistiche di campioni di riferimento composti da casi studio reali (de Fatima Castro et al., 2015; Ji et al., 2016; Lasvaux et al., 2017; Simonen et al., 2017), dai quali è possibile anche estrapolare un modello di riferimento che sia in grado di rappresentare un edificio comune (Lavagna et al., 2018) o specifico (Wittstock et al., 2010; König & De Cristofaro, 2012; Moschetti et al., 2015).

I *benchmark* LCA possono essere espressi come singoli valori da raggiungere o come un *range* di valori in cui il dato ambientale dell'edificio deve "cadere" per raggiungere l'obiettivo di sostenibilità. In letteratura, i *benchmark* LCA per gli edifici e le tecnologie costruttive sono spesso tre: il valore *target*, il valore medio di riferimento (*reference-median value*) e il valore limite di sostenibilità (*limit value*).

Il *target* rappresenta il limite superiore della scala di valutazione della sostenibilità ambientale dell'edificio e può essere considerato, teoricamente, il livello più elevato che un edificio possa raggiungere utilizzando una determinata tecnologia (Häkkinen, 2012). Il *target* è spesso un valore che può essere raggiunto in una prospettiva a medio-lungo termine ed è il valore che, se utilizzato in modo corretto, può spingere il mercato delle costruzioni verso nuovi obiettivi di sostenibilità, con un miglioramento continuo delle *performance* ambientali del patrimonio costruito. Il valore medio di riferimento rappresenta lo stato dell'arte di uno specifico contesto o di una determinata tecnologia costruttiva, mentre il valore limite è il valore più basso accettato nella scala di valutazione della sostenibilità ambientale di un edificio; esso non è deciso a priori, ma rappresenta la minima prestazione ambientale di un campione di riferimento (Ganassali et al., 2018).

A questi tre livelli di sostenibilità si unisce spesso il valore di *best practice* (Häkkinen, 2012), posto nella scala di valutazione tra il valore *target* e il valore medio. Il *best practice* rappresenta così una *performance* ambientale elevata, che è possibile raggiungere mediante azioni di miglioramento ed efficientamento energetico, con l'impiego di tecnologie e materiali costruttivi più performanti.

Variabilità e differenti fonti dei benchmark LCA

La tabella 4.2.1 mostra le molteplici fonti dei *benchmark* LCA. Essi possono essere valori elaborati da prescrizioni legislative o normative, le quali fissano valori *target* o di *best practice* al fine di stabilire una prestazione ambientale di edificio riconosciuta dal campo normativo. Ne sono un esempio i progetti svizzeri *2000-Watt Society* e *2000-Watt Site*, che certificano insediamenti virtuosi nella tutela del clima e nella gestione delle risorse.

I valori soglia LCA possono anche essere basati su presupposti teorici economici e tecnici, i quali scelgono valori ottimali per un dato periodo e contesto costruttivo. Valori di *best practice*, valori medi di riferimento e valori limite sono invece spesso basati sull'analisi statistica di uno specifico campione (con valori medi, quartili, percentili, etc.), la quale consente la determinazione oggettiva di tre o più valori che includono gli attributi dell'edificio (Ganassali et al., 2017).

In letteratura, per elaborare *benchmark* LCA, vengono utilizzati differenti metodi matematici, quali normalizzazione semplice, *Ordinary Least Square* (OLS), *Data Envelopment Analysis* (DEA), *Stochastic Frontier Analysis* (SFA), e *Artificial Neural Network* (ANN) (Filippin, 2000; Chung et al., 2006; Chung, 2011; Attia et al., 2012; Li et al., 2014; Hong et al., 2014).

Nel settore delle costruzioni, la scelta di differenti tipologie di *benchmarking* e di *benchmark* LCA dipende strettamente dallo scopo degli *stakeholder* e di come essi intendono raggiungere i valori di sostenibilità preposti. È possibile affermare che i *benchmark* LCA non possono essere considerati valori fissi e immutabili, derivando da analisi di edifici differenti l'uno dall'altro con sistemi costruttivi in continuo aggiornamento; al contrario essi sono variabili e possono modificarsi sulla base di molteplici fattori. Questi possono essere ad esempio la zona climatica di riferimento e il rischio sismico (Rasmussen et al, 2019; Lavagna et al, 2018; Gervasio & Dimova, 2018), le caratteristiche dell'edificio, quali la funzione, l'occupazione giornaliera e la tecnologia costruttiva (Moschetti et al, 2015; Simonen et al, 2017), la qualità d'uso degli spazi da parte dell'utenza (Ji et al, 2016) e le scelte metodologiche dello studio *Life Cycle Assessment*, che può influenzare i risultati finali e la loro interpretazione (Blengini, 2009; Ortiz et al, 2010; Minne & Crittenden, 2015; Mahler & Schneider, 2017; Rasmussen et al, 2018).

In questo modo la scala di sostenibilità ambientale creata dai *benchmark* LCA è variabile e può cambiare periodicamente in base allo stato di avanzamento scientifico e tecnico del settore delle costruzioni.

La variabilità dei *benchmark* LCA è un aspetto importante, poiché costringe gli esperti a prestare attenzione ai molteplici parametri che possono influenzare i valori di riferimento. Se aspetti fondamentali quali metodo di *benchmarking*, fascia climatica, requisiti costruttivi, tecnologia costruttiva e scenari di uso di un edificio possono modificare i valori medi, allora l'applicazione di un determinato valore, o di un *range* di valori, può non essere corretta in un determinato contesto caratterizzato da contesto geografico e/o tecnologie costruttive differenti.

4.2.2 Applicazione dei benchmark LCA nel settore delle costruzioni

I *benchmark* LCA possono essere utilizzati come strumento di supporto decisionale nel processo di progettazione e gestione degli edifici (de Fatima Castro et al., 2015). I *benchmark* possono divenire strumenti fondamentali per l'elaborazione di un quadro generale di sostenibilità ambientale o per lo sviluppo di informazioni quantitative e oggettive correlate alle prestazioni ambientali degli edifici (Zimmerman et al., 2005). La Tabella 4.2.2 mostra alcuni dei principali studi sul *benchmark* LCA.

| Tipologie di benchmark | Possibile fonte del benchmark |
|------------------------|--------------------------------------|
| Valori Target | Target Politico |
| | Ottimizzazione economica |
| | Ottimizzazione tecnica |
| Best Practice | Analisi statistica (primo quartile) |
| Valore di riferimento | Analisi statistica (valore medio) |
| Valore Limite | Analisi statistica (quarto quartile) |
| | Valore minimo legislativo |

Tabella 4.2.1 Possibili fonti dei *benchmark* ambientali e LCA. Fonte: Hakkinen et al, 2012.

In Italia, *benchmark* LCA relativi ai materiali costruttivi, ai pacchetti tecnologici e al sistema edificio nella sua complessità sono contenuti nei protocolli ambientali per la certificazione degli edifici (*Green Building Rating Systems*). Nei protocolli ambientali i *benchmark* sono utilizzati come valore soglia da trapiandare e il loro raggiungimento è associato a un punteggio (differente in ogni certificazione) che sommato ai punti derivanti dal soddisfacimento di altri requisiti di sostenibilità ambientale colloca l'edificio in un *range* di sostenibilità (Ganassali et al., 2018; Wang, 2015).

Benchmark LCA di edificio sono esplicitati sotto forma di valore numerico nel protocollo tedesco DGNB (*Deutsches Gutesiegel Nachhaltiges Bauen*); i tre valori (limite, medio e *target*) sono calcolati sulla base dell'analisi statistica del parco immobiliare tedesco caratterizzato da buone *performance* energetiche (Köning & De Cristofaro, 2012). Valori numerici assoluti sono utilizzati anche nella certificazione energetica Minergie-ECO, in cui è stabilito un *range* di sostenibilità relativo all'energia grigia in cui il professionista deve far ricadere le *performance* energetiche dell'edificio. Al contrario, *benchmark* LCA sotto forma di modello virtuale sono utilizzati nel protocollo americano LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), in cui un edificio di riferimento basato su standard costruttivi nazionali diviene il modello di confronto, che il professionista utilizza per dimostrare la riduzione dei valori di sei categorie di impatto ambientale nel progetto reale.

Benchmark LCA di tecnologie costruttive sono utilizzati invece nel protocollo BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), in cui i parametri ambientali del sistema edilizio sono inseriti in una scala di valutazione da A+ a E; il *benchmarking* avviene quindi attraverso il confronto degli impatti ambientali dei sottosistemi contenuti in un *database* e i valori dei pacchetti costruttivi del progetto.

Il campo dei materiali costruttivi non è ancora interessato dalla definizione di *benchmark* LCA, tuttavia, altri prodotti del mercato, come batterie, pitture decorative, carta, lamiera in acciaio, etc., possono utilizzare i *benchmark* elaborati nei progetti pilota della PEF (*Product Environmental Footprint*), i quali formano una scala di valori da A a E, con A che rappresenta la migliore prestazione, C che rappresenta il dato statistico medio ed E che rappresenta il valore limite (Allacker et al., 2018).

In Italia, nuovi valori soglia ambientali sono stabiliti a livello nazionale nei Criteri Ambientali Minimi (CAM), al fine di migliorare il processo di sostenibilità delle costruzioni e dei prodotti negli edifici pubblici. Tuttavia, non si tratta di valori di impatto ambientale da rispettare o raggiungere, ma di valori indicanti la percentuale di materiale riciclato contenuto in un prodotto, stabilendo per la prima volta un parametro ambientale specifico per la partecipazione ad un bando di gara.

Comunicazione dei benchmark LCA

I valori di riferimento possono essere espressi secondo modalità differenti, strettamente correlate allo scopo degli utilizzatori. La comunicazione dei valori LCA nei *benchmark* è importante per promuovere la sostenibilità ambientale e incentivare differenti *stakeholder* ad utilizzarli, assicurando così la trasparenza dei risultati e una valutazione ambientale completa (Lavagna, 2008). Infatti, vedere valori espliciti di impatto ambientale consente di stimolare la scelta consapevole dei professionisti verso soluzioni progettuali più *green*, avendo in chiaro il valore di sostenibilità che deve essere raggiunto (Nissinen et al., 2007). Esperti LCA privilegiano l'utilizzo di *benchmark* espressi in numero assoluto, così da poter confrontare differenti valori di impatto ambientale, mentre altri *stakeholder* prediligono una comunicazione dei parametri ambientali efficace e diretta, che sia in grado di mostrare un

Tabella 4.2.2 Differenti tipologie di *benchmark* LCA di edificio elaborati in letteratura. Fonte: Ganassali, 2019.

| Funzione | Benchmarking | Benchmark | Fonte |
|--------------|--------------------|---|------------------------------|
| Residenziale | Analisi statistica | (kgCO ₂ -eq/m ² NFA/year) Limite: 23,8 Medio: 17 Target: 11,9 | König & De Cristofaro, 2012 |
| Ospedale | Analisi statistica | (kgCO ₂ -eq/m ² NFA) Medio: 1,39*10 ² - 1,11*10 ² Target: 9,81*10 ¹ - 8,23*10 ¹ | de Fátima Castro et al, 2015 |
| Residenziale | Analisi statistica | (kgCO ₂ -eq/m ² GFA) Medio: 3,42 E+01 | Moschetti et al, 2015 |
| Scolastica | Analisi statistica | (kgCO ₂ -eq/m ² GFA) Medio: 3,05 E+03 | Ji et al, 2016 |
| Residenziale | Analisi statistica | (kgCO ₂ -eq/m ² NFA/year) Valore medio di: - Materiali e componenti: 8,4 - Consumi energetici: 3,1 - Consumi idrici: 0,3 | Lasvaux et al, 2017 |
| Residenziale | Analisi statistica | (kg CO ₂ -eq/m ² GFA*year) Valore limite di: - Ab. singole: 8,71 - 11,27 - Ab. collettive: 9,94 - 10,75 (kg CO ₂ -eq/m ² GFA*year) Valore medio di: - Ab. singole: 7,22 - 8,94 - Ab. collettive: 6,30 - 7,32 (kg CO ₂ -eq/m ² GFA*year) Best practice di: - Ab. singole: 2,53 - 5,01 - Ab. collettive: 4,88 - 5,37 | Gervasio et al, 2018 |
| Residenziale | Analisi statistica | Valore medio: - 2.51 E+03 (kg-CO ₂ -eq/EU citizen*dwelling*year) - 6.08 (kg-CO ₂ -eq/dwelling*dwelling type*year) | Lavagna et al, 2018 |

livello di sostenibilità semplice da riconoscere (ad esempio la scala da A a E con una gamma di colori dal verde al rosso in base alla lettera raggiunta dal progetto). Sulla base di questi modelli di diffusione di *benchmark*, gli sviluppatori o i professionisti possono comunicare il livello di sostenibilità ambientale raggiunto e stimolare la creazione di nuove opportunità commerciali.

4.2.3 Stakeholder e benchmark LCA

I *benchmark* LCA possono essere utilizzati come strumento di supporto decisionale nel processo. Oggi gli *stakeholder* del settore delle costruzioni condividono la preoccupazione sul limite delle risorse naturali e non rinnovabili, comprendendo che l'edilizia è direttamente responsabile degli impatti ambientali ad oggi oggetto di dibattito scientifico, e pubblico, internazionale.

Numerosi studi (Ding, 2008; Wallbaum et al., 2008; Lupisek et al., 2010; Bal et al., 2013; Ganassali, 2019) analizzano come la valutazione ambientale del settore delle costruzioni sia percepito e affrontato da molteplici *stakeholder*, quali architetti, ingegneri, costruttori, ricercatori, *contractor*, etc., che sempre più spesso richiedono *benchmark* ambientali che siano in grado di fissare un livello di sostenibilità ambientale da raggiungere e, possibilmente, migliorare.

Gli *stakeholder* dovrebbero avere l'opportunità di partecipare all'identificazione dei *benchmark* LCA per edifici e tecnologie costruttive, così da essere stimolati ad individuare e superare le barriere che potrebbero impedire il raggiungimento della sostenibilità ambientale, quali la mancanza di attenzione verso le tematiche ambientali di alcuni soggetti interessati, la mancanza di regolamenti specifici o di politiche ambientali a livello nazionale, oppure la mancanza di richieste di aspetti legati alla sostenibilità ambientale da parte dei committenti (Williams & Dair, 2007). Spesso a questo si unisce la preoccupazione degli *stakeholder* dei profitti a breve termine, ostacolati dai costi più elevati comportati dalle richieste di sostenibilità ambientale (Lützkendorf & Lorenz, 2015). Per questo motivo il mondo della ricerca e della pubblica amministrazione deve coinvolgere i diversi *stakeholder* nel processo decisionale dei *benchmark*, permettendo loro di contribuire positivamente allo sviluppo sostenibile del settore immobiliare (Henry & Paris, 2009).

In Italia, molteplici *stakeholder* cercano di cooperare al fine di migliorare le *performance* ambientali dell'ambiente costruito e degli edifici di nuova costruzione. Un sondaggio dei principali *stakeholder* nazionali (suddivisi tra professionisti, pubbliche amministrazioni, appaltatori, società di consulenza, *facility manager*, produttori e ricercatori) rileva come essi attribuiscono grande importanza all'uso di parametri ambientali e *benchmark* legati al ciclo di vita degli edifici (Ganassali, 2019). I *benchmark* sono infatti considerati utili strumenti decisionali per raggiungere la sostenibilità ambientale, poiché stabiliscono riferimenti e buone pratiche in grado di guidare complesse attività di progettazione. I *benchmark* possono infatti aiutare le pubbliche amministrazioni nei processi di verifica e valutazione delle gare pubbliche, possono essere utilizzati come supporto decisionale in fase di progettazione delle tecnologie costruttive di un edificio, oppure possono aiutare gli *stakeholder* nella considerazione di aspetti legati alla circolarità dei materiali costruttivi e al processo di riciclo e riuso dei componenti (Tabella 4.2.3).

In particolare, gli *stakeholder* intervistati sottolineano l'importanza dei *benchmark* a supporto della fase iniziale del progetto, al fine di controllare le possibili riduzioni (o incrementi) degli impatti ambientali relativi alle decisioni prese, migliorando così la progettazione integrata (Basbagill et al., 2013; Shi and Yang, 2013; Häkkinen et al., 2015; Birgisdottir et al., 2016). Infatti, l'inclusione di principi e parametri di sostenibilità ambientale in fase preliminare (Tabella 4.2.4) possono evitare modifiche importanti nel progetto in fasi avanzate e risparmio economico (Kolltveit and Grønhaug, 2004).

L'uso di *benchmark* comporta anche l'applicazione di possibili strategie di *marketing* relativo al valore aggiunto del progetto, il quale è portatore di informazioni ambientali trasparenti a

cui i consumatori possono accedere e verificare (Alwaer et al., 2010). Inoltre, edifici certificati attraverso protocolli ambientali internazionali mostrano oggi un aumento del prezzo di vendita compreso tra il 5 e il 10%.

| Stakeholder | Ruolo e decision making process | Benchmark |
|--------------------------|---|---|
| Professionisti | Assistenza al cliente nella formulazione dei requisiti ambientali. | Valore Target |
| | Selezione dei prodotti e delle tecnologie costruttive, nonché ottimizzazione delle prestazioni ambientali ed energetiche dell'edificio attraverso il confronto di diverse varianti. | Best Practice / Valore medio |
| | Sviluppo di piani di manutenzione e riparazione dei componenti dell'edificio | Best Practice / Valore medio |
| | Sviluppo di interventi futuri di demolizione dell'edificio con particolare attenzione alla facilità di smantellamento e riciclaggio dei materiali e dei componenti. | Best Practice / Valore medio |
| Produttori | Miglioramento e ottimizzazione dei prodotti mediante rinnovamento dei processi produttivi e miglioramento prestazioni tecniche dei prodotti. | Best Practice / Valore medio |
| | Sviluppo di strutture e soluzioni a supporto del riciclo del prodotto. | Best Practice / Valore medio |
| Amministrazione pubblica | Sviluppo di nuovi obiettivi di sostenibilità ambientale integrati a politiche nazionali relativi all'efficienza energetica e/o prestazionale degli edifici. | Valore Target |
| | Sviluppo di nuovi programmi di finanziamento che incorporino i valori di sostenibilità ambientale e inclusione dei requisiti ambientali negli appalti pubblici (GPP e SPP). | Valore Target/ Best Practice / Valore medio |
| | Elaborazione valori medi da utilizzare nelle fasi preliminari dei bandi di gara | Valore medio |
| Contractor | Riduzione dei consumi in cantiere e degli impatti legati al trasporto in sito dei prodotti. | Best Practice / Valore medio |
| | Gestione dei rifiuti di cantiere | Best Practice / Valore medio |
| | Sviluppo di servizi legati al ciclo di vita dei materiali dell'edificio al fine di ridurre i cicli di manutenzione. | Best Practice / Valore medio |

Tabella 4.2.3 *Stakeholder*, ruoli ricoperti nel *decision making process* e *benchmark* ambientali che possono essere utilizzati. Fonte: Ganassali, 2019.

Un altro importante obiettivo, che è possibile raggiungere utilizzando i *benchmark* LCA nelle attività di progettazione degli edifici, è il traguardo degli obiettivi condivisi a livello globale (come la strategia EU 2030 o il *target* del COP di Parigi che definisce un piano d'azione globale per evitare il riscaldamento globale sotto i 1.5°C) e la conseguente definizione di nuovi livelli di sostenibilità.

4.2.4 Conclusioni

L'importanza dei *benchmark* ambientali legati al ciclo di vita di edifici, tecnologie costruttive e componenti è sottolineata dall'interesse degli *stakeholder* verso valori soglia in grado di fissare un livello di sostenibilità ambientale da truardare.

Tuttavia, ciò che si rende necessario è lo sviluppo a livello nazionale di *benchmark* LCA, in cui differenti contesti costruttivi possano essere rappresentati da valori medi di riferimento che guidino gli *stakeholders* verso percorsi di sostenibilità. Sarebbe infatti utile la definizione di un approccio di *benchmarking* condiviso, che possa quindi essere utilizzato per differenti parchi immobiliari, in grado di definire valori medi mutabili che si spostino pian piano verso i livelli più alti di prestazione ambientale, raggiungendo i valori di *best practice* e i *target* più virtuosi. Questo consente agli *stakeholder* del settore delle costruzioni di migliorare le proprie prestazioni con il giusto tempismo e garantisce la loro l'inclusione nel mercato dell'edilizia sostenibile.

| Fase progettazione | Attività | Benchmark |
|-------------------------------|--|--|
| Fase di pre-design | Definizione generale del progetto e dei requisiti di sostenibilità; fornitura assistenza dei clienti e controllo degli obiettivi. | Valore Target (obiettivo politico, tecnico, economico) |
| | Valutazione dei metodi di definizione della sostenibilità ambientale e confronto tra differenti soluzioni progettuali | Valore Target (obiettivo politico, tecnico, economico) |
| Fase preliminare | Decisione dei materiali e delle tecnologie costruttive, includendo gli impatti ambientali nella valutazione della sostenibilità | Best Practice / Valore medio |
| Fase definitiva e di sviluppo | Definizione dettagliata dei componenti costruttivi e valutazione degli impatti ambientali completa per il ciclo di vita dell'edificio. | Best Practice / Valore medio |
| | Valutazione dei valori di impatto ambientale (scehta tra differenti database ambientali). | Best Practice / Valore medio |

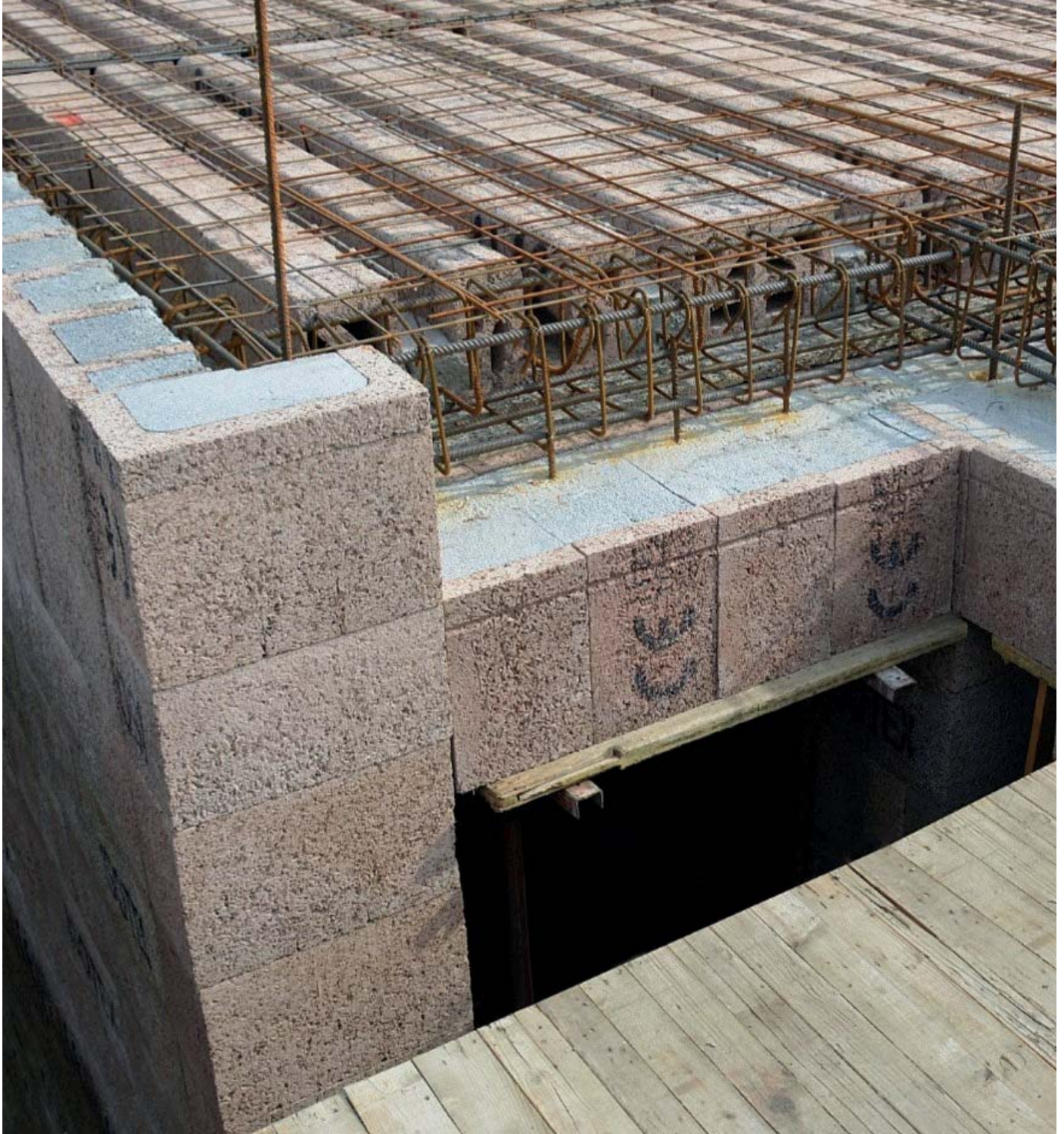
Tabella 4.2.4: *Benchmark* LCA che possono essere utilizzati dagli *stakeholder* nelle differenti fasi progettuali. Fonte: Ganassali, 2019.

Bibliografia

- Allacker K., Ramon D., Mirabella N., Passer A., Rock M., Thuring M., Damen L., Spirinckx C., 2018. *Second Stakeholder Workshop PEF4Buildings*, Brussels.
- Alwaer H., Clements-Croome D.J., 2010. "Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings", *Built Environment*, vol. 45, pp. 799–807.
- Attia S., Evrard A., Gratia E., 2012. "Development of benchmark models for the Egyptian residential buildings sector", *Applied Energy*, vol. 94, pp. 270–284.
- Bal M., Bryde D., Fearon D., Ochieng E., 2012. "The influence of stakeholder engagement in construction sustainability", *Creative Construction Conference 2012*, June 30–July 3.
- Basbagill J., Flager F., Lepech M., Fischer M., 2013. "Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts", *Building and Environment*, vol. 60, pp. 81–92.
- Birgisdottir H., Houlihan-Wiberg A., Malmqvist T., Moncaster A., Rasmussen F.N., 2016. *Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57) - Subtask 4: Case studies and recommendations for the reduction of embodied energy and embodied greenhouse gas emissions from buildings*.
- Blengini G.A., 2009. "Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy", *Building and Environment*, vol. 44(2), pp. 319–330.
- Brejtnod K.N.K.N., Kalbar P., Petersen S., Birkved M., 2017. "The absolute environmental performance of buildings", *Building and Environment*, vol. 119, pp. 87–98.
- Boverket, 2018. *Klimatdeklaration av Byggnader [Climate declaration of Buildings]*, Karlskrona. <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/klimatdeklaration-av-byggnader.pdf>
- Chung W., Hui Y.V., Lam Y.M., 2006. "Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings", *Applied Energy*, vol. 83(1), pp. 1–14.
- Chung W., 2011. "Review of building energy-use performance benchmarking methodologies", *Applied Energy*, vol. 88(5), pp. 1470–1479.
- De Fátima Castro M., Mateus R., Seródio F., Bragança L., 2015. "Development of benchmarks for operating costs and resources consumption to be used in healthcare building sustainability assessment methods", *Sustainability*, vol. 7(10), pp. 13222–13248.
- Ding G.K., 2008. "Sustainable construction-The role of environmental assessment tools", *Journal of environmental management*, vol. 86(3), pp. 451–464.
- Filippin C., 2000. "Benchmarking the energy efficiency and greenhouse gases emissions of school buildings in central Argentina", *Building and Environment*, vol. 35(5), pp. 407–414.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., 2017. "Benchmark LCA e uso di EPD nei Green Building Rating System", *XI Congresso della Rete Italiana LCA. Resource Efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking*, pp. 312–320.
- Ganassali S., Lavagna M., Campioli A., Saporetti S., 2018. "Green Public Procurement and Construction Sector: EPD and LCA based benchmarks of the whole-building", in: *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies*, Springer, pp. 503–513.
- Ganassali S., 2019. *Measure and Limits. Critical analysis and definition of environmental LCA-based benchmarks in the construction sector*. Tesi di dottorato, supervisors: Prof. Monica Lavagna, Prof. Andrea Campioli, Ph.D. Program Architecture, Built Environment and Construction Engineering XXXI ciclo, Politecnico di Milano, Dipartimento ABC.
- Gervasio H., Dimova S., 2018. *Environmental benchmarks for buildings*. EUR 29145 EN,

- Publications Office of the European Union.
- Gervasio H., Dimova S., Pinto A., 2018. "Benchmarking the life-cycle environmental performance of buildings", *Sustainability*, vol. 10(5), pp. 1–30.
- Häkkinen T., Antuña C., Mäkeläinen T., Lützkendorf T., Balouktsi M., Immendörfer A., 2012. "Sustainability and performance assessment and benchmarking of building", in: *SuPerBuildings–Final report*, Ed. Espoo.
- Häkkinen T., Kuittinen M., Ruuska A., Jung N., 2015. "Reducing embodied carbon during the design process of buildings", *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 1-13.
- Henry E., Paris M., 2009. "Institutional dynamics and barriers to sustainable construction in France, the United Kingdom and the Netherlands", in: Symes M., Cooper I. (eds), *Sustainable urban development - Changing professional practice*, vol. 4., London and New York: Routledge, pp. 171-196.
- Hong S., Paterson G., Burman E., Steadman P., Mumovic D., 2014. "A comparative study of benchmarking approaches for non-domestic buildings: Part 1 – top-down approach", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 2, pp.119-130.
- IEA EBC Annex 72, 2016-2021. *Assessing Life Cycle Related Environmental Impacts Caused by Buildings*.
- ISO/DIS 21678:2020. *Sustainability in buildings and civil engineering works — Indicators and benchmarks — Principles for the development and use of benchmarks (under development)*.
- Ji C., Hong T., Jeong J., Kim J., Lee M., Jeong K., 2016. "Establishing environmental benchmarks to determine the environmental performance of elementary school buildings using LCA", *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 818–829.
- Kolltveit B.J., Grønhaug K., 2004. "The importance of the early phase: the case of construction and building projects", *International Journal of Project Management*, vol. 22, pp. 545–551.
- Köning H., De Cristofaro M.L., 2012. "Benchmarks for Life Cycle Costs and Life Cycle Assessment benchmarks of residential buildings", *Building Research & Information*, vol 40(5), pp. 558-580.
- Lasvaux S., Lebert A., Achim F., Grannec F., Hoxha E., Nibel S., Schiopu N., Chevalier J., 2017. "Towards guidance values for the environmental performance of buildings: application to the statistical analysis of 40 low-energy single family houses' LCA in France", *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22(5), pp. 657–674.
- Lavagna M., 2008. *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità*, Hoepli, Milano.
- Lavagna M., Baldassarri C., Campioli A., Giorgi S., Dalla Valle A., Castellani V., Sala S., 2018. "Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock", *Building and Environment*, vol. 145, pp. 260–275.
- Li Z., Han Y., Xu P., 2014. "Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: An overview", *Applied Energy*, vol. 124, pp. 325-334.
- Lüpisek A., Häkkinen T., Hájek P., Pavlu T., Immendörfer A., Supper S., 2010. *D 3.1 – Literature and interview survey about stakeholders' needs and requirements for SB assessment and benchmarking methods*.
- Lützkendorf T., Lorenz D., 2015. "Sustainable property investment: valuing sustainable buildings through property performance assessment", *Building Research & Information*, vol. 33(3), pp. 212–234.
- Mahler P., Schneider P., 2017. "The influence of databases on the Life Cycle Assessment of building components – A comparison of databases using three different wall constructions", in: Bakker J., Frangopol D.M., van Breugel, *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*, London.

- Marsh R., 2016. "LCA profiles for building components: Strategies for the early design process", *Building Research and Information*, vol. 44(4), pp. 358–375.
- Minne E., Crittenden J.C., 2015. "Impact of maintenance on life cycle impact and cost assessment for residential flooring options", *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20(1), pp. 36-45.
- Mortensen L., Kanafani K., Aggerholm S., 2018. *Frivilling Bæredygtighedsklasse i Bygningsreglementet [Voluntary Sustainability Class in the Building Regulations]*. https://www.innobyg.dk/media/75595/frivilligbaeredygtighedsklasse-br-18_final-rapport.pdf
- Moschetti R., Mazzarella L., Nord N., 2015. "An overall methodology to define reference values for building sustainability parameters", *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 413-427.
- Nissinen A., Grönroos J., Heiskanen E., Honkanen A., Katajajuuri J.-M., Kurppa S., Mäkinen T., Mäenpää I., Seppälä J., Timonen P., Usva K., Virtanen Y., Voutilainen P., 2007. "Developing benchmarks for consumer-oriented life cycle assessment-based environmental information on products, services and consumption patterns", *Journal of Cleaner Production*, vol.15, pp. 538-549
- Ortiz-Rodríguez O., Castells F., Sonnemann G., 2010. "Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development", *Science of the Total Environment*, vol. 408(12), pp. 2435–2443.
- Rasmussen F.N., Malmqvist T., Moncaster A., Houlihan Wiberg A., Birgisdóttir H., 2018. "Analysing methodological choices in calculation of embodied and GHG emissions from buildings", *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1487–1498.
- Rasmussen F.N., Ganassali S., Zimmermann R.K., Lavagna M., Campioli A., Birgisdóttir H., 2019. "LCA benchmarks for residential buildings in Northern Italy and Denmark—learnings from comparing two different contexts", *Building Research & Information*, pp. 1-17.
- Russell-Smith S.V., Lepech M.D., Fruchter R., Meyer Y.B., 2015. "Sustainable target value design: Integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance", *Journal of Cleaner Production*, vol. 88, pp. 43–51.
- Shi X., Yang W., 2013. "Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects", *Automation in Construction*, vol. 32, pp. 125-135.
- Simonen K., DeWolf C., Rodriguez B.X., 2017. "Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings", *Technology Architecture and Design*, vol. 1(2), pp. 208-218
- Statsbygg, 2014. *Miljøstrategi 2015–2018 [Environmental Strategy 2015–2018]*. Oslo. <https://statsbygg.no/files/samfunnsansvar/miljo/Miljostrategi2015-2018.pdf>
- Wallbaum H., Silva L., Cole R., Hoballah A., Krank S., 2008. "Motivating stakeholders to deliver change", in: *Conference on Interaction and Confidence-Building Measures in Asia (CICA)*, pp. 38–44.
- Wang E., 2015. "Benchmarking whole-building energy performance with multi-criteria technique for order preference by similarity to ideal solution using a selective objective-weighting approach", *Applied Energy*, vol. 146, pp. 92–103.
- Williams K., Dair C., 2007. "What is stopping sustainable building in England? Barriers experienced by stakeholders in delivering sustainable developments", *Sustainable Development*, vol. 15(3), pp. 135–147
- Wittstock B., Löwe K., Fischer M., 2010. "What is green? Benchmarking the environmental performance of sustainable buildings", *CESB10 Prague*.
- Zimmermann M., Althaus H.-J., Haas A., 2005. "Benchmarks for sustainable construction. A contribution to develop a standard", *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 1147-1157.



4.3 Le dichiarazioni ambientali di prodotto nel mercato europeo. L'esperienza dei blocchi cassero in legno cemento

Le dichiarazioni ambientali di prodotto (*Environmental Product Declaration* – EPD) sono oggi una leva per la competitività delle imprese sul mercato e questo anche grazie alla recente iniziativa lanciata dalla Commissione Europea sotto il più ampio cappello dell'impronta ambientale dei prodotti e delle organizzazioni (*Product and Organization Environmental Footprint* - PEF/OEF)¹.

Le EPD fanno parte della più ampia categoria di "etichette ambientali", sviluppate in conformità alla serie di norme ISO 14020 e finalizzate a supportare la comunicazione tra produttori (*Business-to-Business*) e tra produttori e consumatori (*Business-to-Consumers*). In dettaglio, le EPD sono etichette ambientali conformi alla norma ISO 14025:2006 (etichette di tipo III) e basate su un'analisi di ciclo di vita, così come definita nelle norme intersettoriali ISO 14040:2006 e 14044:2006, per la quantificazione e comunicazione degli impatti ambientali potenziali di un prodotto relativamente ad un numero definito di categorie di impatto ambientale. Le EPD riportano esclusivamente una quantificazione dei potenziali impatti, senza alcun giudizio circa la maggiore o minore qualità ambientale. Lo sviluppo e la pubblicazione di una EPD richiede una verifica da parte di un ente terzo indipendente, relativa sia alla solidità tecnico-scientifica dello studio LCA per la stima degli impatti ambientali che ai dati raccolti dall'organizzazione. Questo allo scopo di garantire la robustezza dei risultati di impatto da comunicare ma anche una comunicazione chiara, che consenta cioè una comparabilità delle informazioni con quelle riportate in EPD di prodotti simili, accomunati dalla stessa funzione.

Nell'ambito del settore costruzioni, per lo sviluppo delle EPD, al di là delle norme intersettoriali sulla metodologia LCA, si fa riferimento allo standard EN 15804 *Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole chiave di sviluppo per categoria di prodotto* (CEN 2019 e 2013). Tale standard è il riferimento per gli studi di impronta ambientale con approccio ciclo di vita nel settore delle costruzioni ed è pensato per riflettere - sia nel calcolo degli impatti che nella loro rendicontazione - le specificità di questo settore. Tra gli aspetti più significativi dello standard si evidenziano i seguenti:

- il principio di modularità, secondo il quale i parametri che descrivono l'impatto ambientale (ad esempio il *Global Warming Potential*) sono calcolati e rendicontati per moduli che vanno dall'A1 a D (Figura 4.3.1);

- il set di parametri che descrivono l'uso delle risorse, i rifiuti e i flussi in uscita, i quali riportano dati di inventario. Tra questi rientrano ad esempio l'uso di materiali secondari, la produzione di rifiuti radioattivi o i materiali inviati a riciclo, tutti e tre espressi in kg.

Lo sviluppo e la pubblicazione di una EPD avvengono nell'ambito di programmi gestiti da diversi operatori di programma. A livello generale i programmi EPD possono distinguersi tra di loro per il legame con il territorio, che può essere più o meno accentuato e valorizzato all'interno di una specifica area geografica, e per i settori economici coperti. Ogni operatore di programma adotta per lo sviluppo delle EPD delle regole generali (ad es. *General Program*

¹ La PEF/OEF (Recommendation 2013/179/EU), lanciata nel 2013, definisce la metodologia raccomandata dell'EU per misurare e comunicare sul mercato i potenziali impatti ambientali di prodotti e organizzazioni. Questa iniziativa è nata per armonizzare i diversi metodi per il calcolo dell'impronta ambientale e consentire ai consumatori di fare scelte informate, creando al contempo le condizioni per un'equa competizione tra le aziende dei vari settori che operano sul mercato europeo e internazionale. I vantaggi associati ad una metodologia armonizzata sono sicuramente la più alta fiducia dei consumatori nelle informazioni comunicate da parte dei produttori e la riduzione dei costi per le aziende che operano in più contesti geografici.

Francesca Reale

Architetto, PhD, Senior LCA and Sustainability Analyst presso Ecoinnovazione srl, spin off di ENEA.

E-mail: f.reale@ecoinnovazione.it

Gioia Garavini

Laureata in Scienze Ambientali, LCA Analyst presso Ecoinnovazione srl, spin off di ENEA.

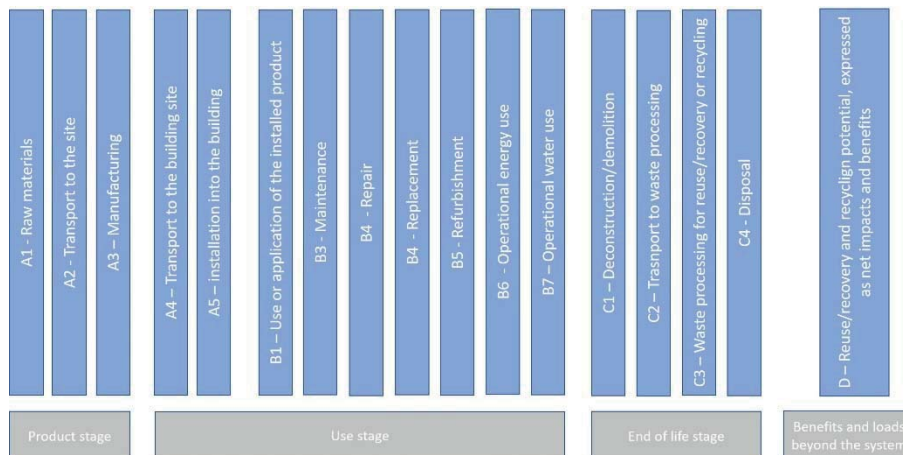
E-mail: g.garavini@ecoinnovazione.it

Alessandra Zamagni

Ingegnere ambientale, PhD, Senior LCA and Sustainability Analyst e Consigliere Delegato di Ecoinnovazione srl, spin off di ENEA.

E-mail: a.zamagni@ecoinnovazione.it

Figura 4.3.1 Moduli per l'analisi e la rendicontazione degli impatti dei prodotti da costruzione, come definiti da EN 15804.



Instructions - GPI, per l'International EPD® System) e/o delle regole (o sub-regole) specifiche per categoria di prodotti (*Product Category Rules* o *sub-Product Category Rules* – PCR/sub-PCRs) nelle quali vengono definiti tutti gli aspetti tecnici e procedurali per il conseguimento dell'EPD e attraverso le quali si forniscono indicazioni per aspetti metodologici sui quali gli standard di riferimento lasciano dei margini di discrezionalità (ad esempio, gestione della multifunzionalità, definizione dell'unità funzionale/unità dichiarata, modellazione dei mix energetici).

Ci sono numerosi programmi per lo sviluppo e pubblicazione di EPD nel settore costruzioni, tra i più noti The International EPD® System, il tedesco IBU (Institut Bauen und Umwelt e.V.) o il francese INIES (*French national reference database for environmental and health data on construction products and equipment*), ognuno dei quali richiama nelle proprie regole generali e/o specifiche lo standard EN 15804. Lo standard EN 15804 è stato recentemente rivisto in alcune sue parti allo scopo di una maggiore convergenza con la metodologia PEF (metodologia intersettoriale)². La versione ad oggi disponibile è la EN 15804:2012+A2:2019. Tra i principali cambiamenti introdotti rispetto alla precedente versione si evidenziano:

- il metodo di valutazione dei potenziali impatti ambientali (*Life Cycle Impact Assessment* – LCIA), allineato con quello della PEF, versione 3.0.
- l'obbligatorietà di includere nell'analisi, al di fuori di pochissime eccezioni, almeno i moduli da A1 ad A3, da C1 a C4, e il modulo D, a differenza della precedente versione dello standard in cui l'obbligatorietà è limitatamente ai moduli da A1 ad A3.

Nonostante i recenti aggiornamenti, lo standard rimane una guida che include indicazioni generali per i principali aspetti della metodologia LCA con la conseguenza che sussiste un margine di discrezionalità nella sua applicazione all'interno dei vari programmi EPD. Un esempio di margine di discrezionalità è relativo al fine vita per il quale non sono fornite istruzioni per la definizione degli scenari. Questo margine di discrezionalità, unitamente a eventuali differenze circa le regole di natura più procedurale, possono in ultimo determinare significative differenze tra le EPD realizzate con i diversi programmi, con conseguenti limiti alla comparabilità delle informazioni ambientali pubblicate per prodotti simili ma con operatori di programma diversi e potenziali costi aggiuntivi per le aziende che operano in mercati diversi (geograficamente).

Per fronteggiare questa problematica, è nata l'associazione no-profit internazionale Eco-Platform che vede la partecipazione di tutti gli operatori di programma EPD, dell'Associazione

² Sebbene la PEF si ponga come riferimento per gli studi di impronta ambientale in tutti i settori, compreso quello delle costruzioni, quest'ultimo ha storicamente utilizzato lo standard EN 15804 che viene infatti richiamato all'interno delle GPI e/o PCR/sub-PCR nei vari programmi EPD. Per evitare il sussistere di iniziative divergenti nella valutazione di impronta ambientale la Commissione Europea ha dato mandato al CEN di armonizzare lo standard EN 15804 con la PEF.

Europea di Mercato per il settore costruzione e di esperti LCA e che ha come principali obiettivi quelli di favorire un'applicazione "armonizzata" dello standard EN 15804 e la mutua riconoscibilità tra tutti gli operatori di programma che operano nel settore costruzioni conformemente allo standard EN 15804. Diverse iniziative di mutua riconoscibilità sono già in essere tra diversi operatori di programma, attraverso le quali, una EPD conseguita con un determinato programma possa essere riconosciuta e pubblicata anche all'interno di un altro programma.

In questo capitolo, attraverso un caso studio di sviluppo di una EPD per uso in un contesto europeo, si mettono in luce le principali differenze riscontrate tra i programmi EPD utilizzati. Il caso riguarda i blocchi cassero in legno-cemento prodotti dall'azienda di Poviglio (Reggio Emilia) che ha sviluppato l'EPD contestualmente con The International EPD® System e il programma INIES.

4.3.1 Sviluppo delle EPD della famiglia dei blocchi cassero: la scelta del programma EPD

Il caso applicativo è relativo alle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto per la famiglia dei blocchi cassero in legno-cemento prodotti dall'azienda di Poviglio (Reggio Emilia).

I blocchi cassero rappresentano una tecnologia costruttiva sviluppata in Germania negli anni '50 per pareti portanti interne ed esterne. Una delle caratteristiche principali di questa tecnica costruttiva è la semplicità di messa in opera in quanto i blocchi vengono posati a secco.

La struttura principale del blocco è costituita da legno di abete di recupero da pallet a fine vita macinato, selezionato e mineralizzato con cemento Portland. All'interno di essa viene generalmente inserito un isolante in PSE con grafite o sughero per aumentarne le prestazioni termiche. La famiglia di prodotti comprende blocchi con spessore che varia da 20 a 40 cm.

L'azienda ha manifestato l'interesse ad intraprendere un percorso di certificazione ambientale dei propri prodotti a seguito della crescente richiesta da parte del mercato europeo, in particolar modo francese, di informazioni ambientali certificate e validate da un ente terzo sui loro prodotti per la partecipazione a cantieri residenziali.

In Francia, infatti anticipando le recenti direttive a livello europeo sulle prestazioni energetiche in edilizia finalizzate ad una totale decarbonizzazione del settore immobiliare al 2050, è già stata avviata dal 2005 una strategia nazionale per la riduzione dei gas effetto serra nell'ambito della quale sono individuati dei requisiti prestazionali per i nuovi edifici. Sulla base di tali requisiti è stato sviluppato uno standard nazionale BBC (*Batiment Basse Consommation*, edificio a basso consumo), così come specificato dall'etichetta BBC – *effinergie*. Questa etichetta si è successivamente evoluta nell'etichetta *Effinergie+* con requisiti più stringenti a seguito dell'implementazione del piano *Grenelle Environnement* (Plan Bâtiment Durable; EEA, 2011).

L'azienda quindi, sulla base di un'analisi del suo mercato di riferimento e delle diverse normative cogenti ed iniziative a carattere volontario in esso presenti, ha deciso di intraprendere un duplice percorso di certificazione dei propri prodotti: uno più specificatamente orientato al mercato francese, che presenta caratteristiche peculiari e leggi più stringenti a livello nazionale, e l'altro con valenza e riconoscibilità nel contesto europeo.

The International EPD System e INIES

A livello europeo il programma maggiormente utilizzato è rappresentato dall'International EPD® System gestito dall'operatore EPD International AB con clienti e organizzazioni associate

in diversi paesi, come l'Italia, la Spagna e gli Stati Uniti. Il programma è basato sulla norma ISO 14025 e EN 15804, ed ha un database consultabile *online* contenente più di 1000 EPD principalmente appartenenti al settore costruzioni e agro-alimentare.

Per lo sviluppo di un EPD secondo l'International EPD® System i documenti di riferimento sono rappresentati dalle *General Programme Instruction* (GPI) e dalle *Product Category Rules* (PCR) di riferimento applicabili per la specifica categoria di prodotti. La validità di un EPD è generalmente di 3 anni dalla sua data di pubblicazione, ad eccezione per quelle sviluppate per i prodotti da costruzione secondo la EN 15804 che hanno validità 5 anni.

Durante il periodo di validità delle EPD, l'azienda proprietaria del certificato è tenuta a dimostrare all'ente di certificazione accreditato dall'International EPD® System che il profilo ambientale dei prodotti contenuti nella dichiarazione ambientale non abbia subito variazioni significative (quantificate come peggiorative del 10% rispetto ai risultati LCA riportati nella dichiarazione) e che le informazioni relative alla composizione e prestazioni tecniche dei prodotti rimangano valide.

Nel contesto francese, dal 2004 INIES rappresenta la piattaforma nazionale di riferimento sulle dichiarazioni ambientali e sanitarie di prodotti, attrezzature e servizi gestita in modo partecipato dagli attori dell'industria delle costruzioni, tra cui le Autorità Pubbliche.

La governance della banca dati INIES è disciplinata da:

- un Consiglio di Sorveglianza, presieduto dall'HQE-GBC Alliance (*Alliance des professionnels pour un cadre de vie durable*), che ha un ruolo politico e strategico e sovrintende all'etica e al corretto funzionamento della piattaforma;

- un comitato tecnico, presieduto dall'AIMCC (*Association des Industries de Produits de Construction*), che, attraverso il suo ruolo operativo, assicura la messa in linea dei dati nel rispetto delle regole di ammissione della banca dati, secondo le norme di riferimento stabilite nell'ambito della commissione di norme AFNOR P01E *Sviluppo sostenibile nell'edilizia*.

Dal 2011, l'Alliance HQE-GBC, un'associazione riconosciuta di interesse pubblico, è il proprietario e gestore del database.

Le dichiarazioni ambientali consultabili nel database INIES sono denominate FDES- *Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire* (Scheda di Dichiarazione Ambientale e Sanitaria) e sono relative esclusivamente al settore delle costruzioni.

Per elaborare una FDES, occorre fare riferimento ai complementi nazionali dello standard EN 15804 (NF EN 15804/CN e NF EN 15804+A1) e alle leggi nazionali di riferimento (*Arrêté du 23 décembre 2013 relatif à la déclaration environnementale des produits de construction et de décoration destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment*) oltre che alle regole generali di programma «Programme INIES».

Tali documenti definiscono ulteriori specifiche da rispettare per la selezione dell'unità funzionali e le prestazioni ambientali e sanitarie da riportare nella dichiarazione.

Rispetto ad un EPD quindi una FDES contiene indicatori ambientali aggiuntivi – *pollution de l'eau e pollution de l'air*- e le informazioni relative al comfort di utilizzo del prodotto (comfort igrotermico, acustico, visuale, olfattivo, ecc.).

La validità della FDES è come per le EPD pari a 5 anni e una volta pubblicata – a seguito del processo di verifica da parte di organismi accreditati- non è prevista alcuna forma di sorveglianza durante il periodo di validità. Entrambi i programmi fanno parte dell'Eco Platform.

4.3.2 I principali aspetti metodologici e pratici nello sviluppo dello studio

Le EPD sono state sviluppate nel 2018, con in vigore la precedente versione dello standard, ovvero EN 15804:2012+A1:2013. I principali aspetti rispetto ai quali sono state riscontrate delle differenze tra i due programmi EPD riguardano sia aspetti relativi alla metodologia LCA che aspetti più puramente comunicativi.

A livello di metodologia LCA, le differenze riguardano la scelta dei confini del sistema e il metodo di valutazione degli impatti (LCIA).

Relativamente alla scelta dei confini del sistema, i due programmi EPD hanno recepito in modo differente le indicazioni dello standard allora in vigore al momento dello studio. The International EPD® System ha consentito lo sviluppo di EPD comprendenti i soli moduli da A1 ad A3, EPD così dette *from cradle to gate*, ma anche la possibilità di soluzioni intermedie denominate *from cradle to gate with options*, in cui oltre ai moduli da A1 ad A3 si aggiungono moduli a scelta tra l'A4, l'A5, i moduli da C1 a C4 e il modulo D. Il sistema INIES, invece, ha consentito una sola modalità per lo sviluppo delle EPD e cioè quella comprendente tutti i moduli indicati dalla EN 15804 richiedendo inoltre, ad eccezione dei moduli da A1 ad A3, che tutti i moduli siano basati su un contesto geografico francese (ad esempio, per il modulo A4 – trasporto dal sito di produzione al sito di costruzione - occorre ipotizzare una distanza rappresentativa per una destinazione ipotetica in Francia), di fatto limitando la valenza dell'EPD a tale contesto.

Con riferimento al caso specifico, l'azienda aveva interesse a conseguire una EPD con INIES almeno per i blocchi a richiesta, volontà derivante da interessi specifici in Francia, dove il programma INIES è fortemente riconosciuto e valorizzato all'interno delle gare d'appalto. Al contempo, l'azienda aveva interesse a garantire una valenza geografica più ampia per un numero più alto possibile di varianti, contenendo tempi e costi per il conseguimento delle EPD. Per tutti i blocchi standard è stata sviluppata una EPD con The International EPD® Systems, per il quale è stato scelto un confine di sistema *from cradle to gate* (moduli da A1 ad A3). Lo sviluppo di una EPD con il sistema INIES anche per i blocchi standard avrebbe richiesto di aggiungere lo studio dei restanti moduli e di farlo con riferimento al contesto francese. Al contrario, dei blocchi a richiesta, per i quali era prioritaria l'EPD con INIES, soltanto due potevano essere certificati anche con The International EPD® Systems, in quanto in tale programma non erano accettati prodotti per i quali non c'è stata alcuna produzione nell'anno di riferimento, come successo per la variante con il sughero. Alla luce di questa trasferibilità parziale, l'azienda ha optato per mantenere esclusivamente su INIES, l'intera famiglia dei blocchi cassero a richiesta.

Indicatori di impatto ambientale

Relativamente al metodo di valutazione degli impatti, il metodo indicato dalla versione EN 15804 disponibile al momento dello studio è CML2001, versione 4.2. The International EPD® System recepisce questa indicazione senza alcuna modifica. Al contrario, il programma INIES, ha adottato la versione precedente del metodo, ovvero la 4.1, che ha ulteriormente modificato in alcune sue parti, e a cui si aggiungono nuove categorie di impatto ambientale. Le principali differenze di metodo che ne risultano sono di seguito sintetizzate:

- nel metodo francese sono introdotte due categorie di impatto aggiuntive denominate *pollution de l'air* e *pollution de l'eau*, con indicazioni precise per il calcolo contenute nello standard francese che recepisce lo standard EN 15804;
- per quanto riguarda la categoria d'impatto acidificazione (AP), il programma INIES esclude

le sostanze triossido di zolfo e acido solforico;
- per quanto riguarda la categoria d'impatto Consumo di risorse minerali (ADPelements) il programma INIES include ulteriori sostanze rispetto a quelle definite dal metodo CML, tra cui bentonite e calcare;
- relativamente alla categoria Ossidazione fotochimica (POCP), il programma INIES richiede di utilizzare il protossido di azoto come *proxy* del monossido di azoto per il calcolo degli impatti;
- per la categoria Cambiamento climatico (GWP) non sono considerate le emissioni biotiche.
Nel caso dei blocchi in legno-cemento, dunque a parità di materiale analizzato (es 1 kg di legno-cemento secondo la ricetta aziendale) gli impatti potenziali risultanti differiscono in 5 categorie ambientali fra quelle incluse in entrambi i programmi.

EPD singole o per famiglie di prodotti

Con riferimento agli aspetti pratici, sono state riscontrate differenze in termini di possibilità di raggruppamento di prodotti simili all'interno della stessa EPD. Mentre The International EPD® System adotta un approccio molto flessibile in questo, nel rispetto di tutte le possibilità di comunicazione secondo EN 15804, il programma INIES ha un approccio più restrittivo e richiede che ogni prodotto abbia un'EPD dedicata.

Chiaramente l'effetto di questo approccio restrittivo è strettamente dipendente da un lato dall'unità di analisi rispetto alla quale gli impatti possono essere espressi, che ha a sua volta dei limiti più o meno rigidi in funzione del tipo di prodotto, dall'altro dalle preferenze comunicative dell'azienda tra le opzioni possibili. Nel caso specifico, tutti i blocchi standard, certificati con The International EPD® System, sono contenuti all'interno della stessa EPD. L'azienda ha scelto di riportare l'impatto per mq di blocco ed è stato pubblicato un profilo per ogni variante, essendoci delle differenze reciproche superiori al 10% per almeno una categoria di impatto. Per i blocchi a richiesta, certificati con il sistema INIES, è stato invece necessario pubblicare una EPD per ogni variante.

Il calcolo degli indicatori LCI da inserire nelle EPD

Lo sviluppo delle EPD include anche il calcolo e la pubblicazione degli indicatori LCI. Questo aspetto è fortemente discusso nel mercato delle EPD, in particolare tra i diversi EPD operatori di programma, poiché in realtà lo standard EN 15804 (europeo o nazionale) non fornisce indicazioni specifiche per il calcolo di questi indicatori. I vari operatori di programma possono chiaramente definire regole interne, come nel caso di The International EPD® System che fornisce indicazioni specifiche per il calcolo dell'indicatore relativo all'uso dell'acqua.

4.3.3 Il profilo ambientale dei blocchi cassero

Considerata la scelta vincolata del sistema INIES di includere un solo prodotto per FDES, si è deciso di limitare i prodotti certificati secondo questo schema al numero minimo di prodotti di punta ritenuti necessari dall'azienda, al momento dello studio, per il mercato francese e di pubblicare il profilo ambientale dei prodotti rimanenti in un'unica EPD sviluppata secondo lo schema The International EPD® System. Non è possibile pertanto effettuare un diretto confronto tra i profili ambientali dei prodotti secondo i due schemi perché a parità di unità funzionale cambia l'incidenza in peso del prodotto e la composizione percentuale tra la struttura in legno-cemento e l'isolante.

| Categoria d'impatto | Profili ambientali – schema International EPD® System - A1-A3 | | | | | | |
|----------------------------------|---|----------|----------|-------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|
| | HB 20 | HB 25/16 | HB 30/19 | HDIII 33/10 (PSE con grafite) | HDIII 30/7 (PSE con grafite) | HDIII 44/15-2 | HB 25/4 (PSE con grafite) |
| ADPE [kg Sb-Equiv.] | 1,28E+02 | 1,83E+02 | 2,20E+02 | 3,29E+02 | 2,70E+02 | 3,05E+02 | 2,34E+02 |
| ADPF [MJ] | 7,59E-06 | 1,09E-05 | 1,31E-05 | 1,24E-05 | 1,10E-05 | 1,82E-05 | 1,10E-05 |
| AP [kg SO ₂ -Equiv.] | 3,70E-02 | 5,29E-02 | 6,38E-02 | 6,47E-02 | 5,69E-02 | 8,84E-02 | 5,56E-02 |
| EP[kg Phosphate-Equiv.] | 5,54E-03 | 7,93E-03 | 9,56E-03 | 9,50E-03 | 8,39E-03 | 1,33E-02 | 8,26E-03 |
| GWP [kg CO ₂ -Equiv.] | 2,64E+01 | 3,78E+01 | 4,55E+01 | 4,58E+01 | 4,03E+01 | 6,31E+01 | 3,95E+01 |
| ODP [kg R11-Equiv.] | 4,65E-10 | 6,68E-10 | 7,85E-10 | 7,58E-10 | 6,90E-10 | 1,13E-09 | 6,81E-10 |
| POCP [kg Ethene-Equiv.] | 3,12E-03 | 4,46E-03 | 5,38E-03 | 2,80E-02 | 2,04E-02 | 7,45E-03 | 1,37E-02 |

Tabella 4.3.1 – Profilo ambientale dei blocchi cassero in legno-cemento certificati nell'ambito del programma The International EPD® System - ADPE: *Abiotic depletion potential for non fossil resources*; ADPF: *Abiotic depletion potential for fossil resources*; AP: *Acidification potential*; EP: *Eutrophication potential*; GWP: *Global warming potential*; ODP: *Ozone Depletion Potential*; POCP: *Photochemical Ozone Creation Potential*.

Le Tabelle 4.3.1 e 4.3.2 riportano il profilo ambientale dei blocchi certificati rispettivamente con The International EPD® System e INIES.

| Categoria d'impatto | Profili ambientali – schema INIES | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | HDIII 38/14 (PSE con grafite) | | HDIII 38/14 (sughero) | | HDIII 38/14 (PSE con grafite) | |
| | A1-A3 | tot | A1-A3 | tot | A1-A3 | tot |
| ADPE [kg Sb-Equiv.]* | 1,29E-05 | 1,58E-05 | 1,31E-05 | 1,60E-05 | 1,53E-05 | 1,83E-05 |
| ADPF [MJ] | 3,85E+02 | 6,94E+02 | 3,03E+02 | 6,19E+02 | 4,98E+02 | 8,21E+02 |
| AP [kg SO ₂ -Equiv.]* | 6,88E-02 | 1,82E-01 | 7,78E-02 | 1,94E-01 | 8,31E-02 | 1,99E-01 |
| EP) [kg Phosphate-Equiv.] | 1,00E-02 | 2,81E-02 | 1,40E-02 | 3,33E-02 | 1,21E-02 | 3,14E-02 |
| GWP[kg CO ₂ -Equiv.]* | 4,73E+01 | 8,81E+01 | 4,76E+01 | 8,92E+01 | 5,68E+01 | 9,88E+01 |
| ODP [kg R11-Equiv.] | 7,99E-10 | 8,31E-10 | 7,58E-10 | 7,89E-10 | 9,35E-10 | 9,71E-10 |
| POCP [kg Ethene-Equiv.]* | 3,91E-02 | 5,04E-02 | 8,44E-03 | 1,90E-02 | 5,45E-02 | 6,65E-02 |
| Water pollution [m3/UF]* | 2,48E+00 | 1,47E+05 | 2,11E+00 | 1,48E+05 | 3,15E+00 | 1,49E+05 |
| Air pollution [m3/UF]* | 1,60E+06 | 2,67E+06 | 2,13E+06 | 3,24E+06 | 1,98E+06 | 3,09E+06 |

Tabella 4.3.2 Profilo ambientale dei blocchi cassero in legno-cemento certificati nell'ambito del programma INIES. ADPE: *Abiotic depletion potential for non fossil resources*; ADPF: *Abiotic depletion potential for fossil resources*; AP: *Acidification potential*; EP: *Eutrophication potential*; GWP: *Global warming potential*; ODP: *Ozone Depletion Potential*; POCP: *Photochemical Ozone Creation Potential*. Le categorie d'impatto contrassegnate con un asterisco sono calcolate con una metodologia differente rispetto all'International EPD® System o aggiuntive.

4.3.4 Conclusioni

Il capitolo illustra le principali differenze riscontrate nel caso studio esaminato, differenze che dimostrano come ad oggi le aziende si trovino condizionate nella definizione dei loro percorsi di certificazione. Nel caso specifico analizzato, le principali differenze si sono riscontrate rispetto ai confini del sistema e alle specifiche richieste di contestualizzazione geografica per parte del sistema analizzato, rispetto al metodo di valutazione degli impatti e rispetto al calcolo degli indicatori LCIA. Tali differenze, combinate con altre di natura più pratica quale appunto le possibilità di raggruppare prodotti simili all'interno di un'unica EPD, hanno di fatto limitato il diretto riutilizzo delle informazioni ambientali sviluppate per un programma all'interno di un altro programma. In ragione di ciò, è stato necessario intraprendere due percorsi di certificazione distinti, ripartendo le varianti di prodotto tra due programmi EPD. Alcune delle differenze analizzate, ad esempio quelle legate ai confini del sistema, potranno essere in parte smussate grazie al nuovo standard EN 15804. Tuttavia, per garantire una piena comparabilità delle informazioni riportate nelle EPD pubblicate con programmi diversi e al contempo per mettere le aziende nella condizione di ottimizzare i loro sforzi verso il conseguimento della massima competitività senza barriere di mercato, occorre ancora fare del lavoro di armonizzazione, attraverso un ulteriore adeguamento dello standard, ad esempio in relazione al calcolo degli indicatori LCI, e/o attraverso il massimo impegno da parte degli operatori di programma a concordare una base di regole comuni per l'applicazione dello standard lì dove quest'ultimo lascia comunque dei margini di discrezionalità.

Come è noto le EPD sono utilizzate all'interno di politiche pubbliche, quali ad esempio il *Green Public Procurement*, e/o nel libero mercato, come quello delle certificazioni della qualità ambientale degli edifici (*Rating systems*), di cui sono esempi il DGNB tedesco promosso dal Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, il LEED statunitense promosso dall'U.S. Green Building Council, il protocollo ITACA italiano promosso dall'Istituto per la trasparenza, l'aggiornamento e la certificazione degli appalti, e il più recente sistema Level(s) definito a livello europeo. In tali politiche e strumenti le EPD sono spesso valorizzate in quanto tali, ad esempio riconoscendo un punteggio aggiuntivo per l'utilizzo nell'opera di prodotti dotati di tale certificazione, o in alcune loro parti, ad esempio riconoscendo un punteggio aggiuntivo per prodotti che hanno un contenuto di riciclato, informazione quest'ultima che può essere dichiarata all'interno dell'EPD.

In ragione di questo, diventa ancora più urgente un'azione di armonizzazione tra i vari programmi EPD finalizzata a migliorare ulteriormente la comunicazione delle informazioni ambientali ai consumatori da un lato e a garantire, dall'altro, la massima efficacia di tale attività comunicativa sulla riduzione degli impatti ambientali dell'ambiente costruito. A tal proposito, guide aggiuntive per categorie di prodotto, beneficiando delle lezioni apprese attraverso lo sviluppo delle PEFCR nell'ambito dell'iniziativa PEF (European Commission, 2018), potrebbero sicuramente ridurre le discrepanze tra i diversi programmi EPD e favorire in ultimo la definizione di *benchmark* prestazionali.

Bibliografia

NF EN 15804/CN (June 2016) *Contribution des ouvrages de construction au développement durable — Déclarations environnementales sur les produits — Règles régissant les catégories de produits de construction — Complément national à la NF EN 15804+A1*. AFNOR

NF EN 15804+A1 (April 2014). *Contribution des ouvrages de construction au développement durable —Déclarations environnementales sur les produits —Règles régissant les catégories de produits de construction*. AFNOR

Arrêté du 23 décembre 2013 relatif à la déclaration environnementale des produits de construction et de décoration destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment.

EN 15804:2012+A2:2019 *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*.

EN 15804:2012+A1:2013 *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*.

Ecoinnovazione, 2018. *Technical report: LCA study of wood cement products and components for wall and flooring systems and for acoustic barriers* (Confidential).

European Commission, 2018. *PEFCR Guidance (2018). Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*. version 6.3 May 2018.

European Environmental Agency, 2011. *2011 survey of resource efficiency policies in EEA member and cooperating countries – FRANCE*.

ISO 14040: 2006 *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.

ISO 14044: 2006 *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.

ISO 14025:2006 *Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures*.

Plan Bâtiment Durable, 2020, viewed 9 march 2020 - <http://www.planbatimentdurable.fr/>.

Programme de déclaration environnementale et sanitaire, «Programme INIES» (January 2017).

The International EPD® System, 2017. *General Programme Instructions (GPI) for the International EPD®, VERSION 3*.

The International EPD® System, 2015. *General Programme Instructions (GPI) for the International EPD®, VERSION 2.5*.

The International EPD® System, 2012. *Product Category Rules (PCRs) for construction products and construction services, version 2012:01 2.1*.



Incentivare la cultura del costruire e l'artigianato artistico locali

AMBIENTE, ENERGIA E ACQUA



Minimizzare il consumo energetico e utilizzare le fonti rinnovabili



Evitare, nel costruire e nel risanare, le ricadute negative per l'ambiente



Gestire razionalmente le risorse naturali e proteggere flora e fauna



Preferire metodologie costruttive locali e scegliere materiali da economia circolare con il migliore eco-bilancio possibile



Provvedere alla qualità ottimale dell'acqua potabile

SPAZI DI VITA ECO-SOCIALI



Nelle infrastrutture, badare al mix ottimale tra percorsi brevi verso il luogo di lavoro, i mezzi pubblici, le scuole, i negozi, etc. etc.



Rendere lo spazio vitale dignitoso e sostenibile



Provvedere a sufficienti aree verdi negli insediamenti urbani ed extraurbani



Rafforzare l'approvvigionamento a chilometro zero, includere le reti di fornitori di prodotti e servizi locali e la loro autoproduzione



Scegliere lotti edificabili possibilmente non gravati da problematiche pregresse (di natura ambientale, amministrativa, etc.) e da inquinanti e da rumori

In condizioni reali non sempre possibili, tuttavia, se è necessario, si deve puntare alla loro qualità, senza trascurare la loro accessibilità, media, senza

Do

IL CICLO DELLA CALCE



4.4 Strumenti LCA e LCC per una edilizia sostenibile misurata

Per architetti, ingegneri e consulenti è una necessità e un obbligo morale prendere in considerazione le conseguenze ambientali delle proprie scelte progettuali. Integrando LCT e analisi LCA nella metodologia di progettazione degli edifici, è possibile valutare l'impatto del ciclo di vita dei materiali da costruzione, componenti, sistemi e scegliere le migliori soluzioni che riducono l'impatto ambientale complessivo attraverso: il confronto tra sistemi alternativi di prodotto e produzione con la medesima funzione, il confronto degli impatti ambientali di un prodotto con uno standard di riferimento, l'identificazione degli stadi del ciclo di vita di un prodotto che presentano l'impatto ambientale dominante, la comparazione tra sistemi alternativi per la gestione di rifiuti, l'individuazione d'aree dove realizzare economie o livelli maggiori d'ottimizzazione, la comunicazione d'informazioni ambientali.

Per valutare gli impatti ambientali del ciclo di vita dei prodotti sono disponibili le norme ISO serie 14040, recepite in Italia nelle norme UNI. Conoscere l'impatto ambientale del ciclo di vita dei materiali è quindi fondamentale per scegliere in modo corretto, ed in questo contesto si colloca la certificazione ANAB-ICEA una delle storiche analisi e certificazione che si basa proprio sulla valutazione del ciclo di vita dei materiali, di prodotti e di tecniche di costruzione per edifici ed ambienti sempre più sostenibili ed adatti alla vita. Va inoltre ricordato che uno degli obiettivi principali di questa certificazione è quella di tutelare l'utilizzatore finale riducendo tutti i possibili rischi per la salute e rendendo trasparente l'informazione ambientale sui materiali per la bioedilizia.

4.4.1 La certificazione di prodotto bioecologico

La certificazione di prodotto bioecologico è una delle maggiori richieste da parte dei professionisti e tecnici bioedili interessati all'utilizzo di materiali effettivamente salubri per la salute umana e per l'ambiente. Tale richiesta è emersa soprattutto a partire dagli anni Sessanta, in cui il mondo delle aziende chimiche si concentrava soprattutto sulla produzione di materiali a base petrolchimica perché ritenuti economici e duraturi.

Sulla prima affermazione non c'è obiezione, effettivamente i costi finali risultano vantaggiosi ma non valutati/considerati nello spettro dei reali costi ambientali e di smaltimento che tale percorso ha innescato in conseguenza al loro utilizzo indiscriminato parallelo alla crescita smisurata di aziende divenute poi, grazie alla globalizzazione, multinazionali.

Sulla seconda affermazione riguardante la durabilità dei materiali basterebbe portare ad esempio, edifici in legno aventi una vita centenaria così, ancor più le antiche strutture in mattoni e calce di epoca romana ancora visibili e funzionanti.

Da tutto questo la nostra associazione, votata alla formazione professionale in chiave ecosostenibile in un periodo in cui il fermento ambientalista era molto sentito nel settore edilizio, si è posta nei primi anni novanta nella condizione di assicurare l'utilizzo di prodotti a

Aldo Iacomelli

Ingegnere, PhD in "Tecnologie Energetiche ed Ambientali per lo Sviluppo Sostenibile", Partner di E-Cube SrL.
E-mail: aldo@e3cube.it

Stefania Ganz

Architetto, libero professionista, fa parte del Consiglio Direttivo di ANAB, Associazione Nazionale Architettura Bioecologica. Responsabile della certificazione ANAB-ICEA.
E-mail: certificazione@anab.it

Figura 4.4.1 Esempio di certificazione ANAB-ICEA.

N° [REDACTED]
Ed.03 Rev. 00

Certificato di Conformità

Istituto per la Certificazione Etica ed Ambientale

certifica che il prodotto
[REDACTED]
CATEGORIA PRODOTTO

[REDACTED]
MARCA

Prodotto da
[REDACTED]
AZIENDA PRODUTTRICE

e distribuito da
[REDACTED]
DITTA DISTRIBUTTRICE

**è conforme alle prescrizioni generali e particolari dello
Standard ANAB dei Materiali per la Bioedilizia
(MAT_BIOEDIL.07 Ed.00 Rev.00)**

| Indicatori | |
|-------------------------------------|---|
| Risorse naturali rinnovabili | <i>Incidenza materie prime facilmente rinnovabili su composizione prodotto = 100% Consumi di energia da fonti rinnovabili su consumi totali di energia > 90%</i> |
| Salute umana | <i>Il prodotto e i suoi componenti non sono pericolosi per la salute umana.</i> |
| Qualità dell'ecosistema | <i>Il prodotto e i suoi componenti non sono pericolosi per l'ambiente.</i> |



Logo e Indicazioni di conformità:

Via G. Brugnoli, 15
40122 BOLOGNA
ITALY
Tel. +39-051-272986
Fax. +39-051-232011
www.icea.info

MATERIALI PER LA BIOEDILIZIA
Conformi ai requisiti dei
MAT_BIOEDIL.01 Ed.00 Rev.05 e
MAT_BIOEDIL.07 Ed.00 Rev.00



CERTIFICATO PER LA

| | | |
|--|-----------------------|--|
| <i>Data di emissione</i> 22 Dicembre 2017 | <i>Data revisione</i> | <i>Data di scadenza</i> 31 Dicembre 2020 |
| Res. Certificazione ICEA <i>Dr. Paolo Foglia</i> | | Presidente ICEA <i>Dr. Pietro Campus</i> |

Il presente documento è proprietà di ICEA al quale deve essere restituito su richiesta. Può essere sospeso o revocato in qualsiasi momento da ICEA nel caso di accertata inadempienza dell'organizzazione certificata.

Pag 1 di 1 M.0401 - Ed.00 Rev.00

basso impatto ambientale e privi di sostanze pericolose per l'uomo, gli animali e l'ambiente. L'attenzione progettuale comunque pone le prime basi della circolarità con la preferenza soprattutto dei materiali della tradizione locale se non addirittura quando possibile, con il prelievo diretto dal sito di cantiere o nelle sue vicinanze, così come la storia dei nostri borghi e città di primo impianto ci insegnano.

Detto ciò continua ad esserci un vuoto normativo riguardante i materiali così detti "naturali" per intenderci, sia a livello nazionale che europeo, davvero incomprensibile considerato che sono elementi storicamente sempre utilizzati e che possono creare filiere locali virtuose con una limitatissima alterazione da un punto di vista qualitativo e quantitativo del nostro

territorio se realizzata con impegno di reintegro. In buona sostanza il motto dalla terra alla terra, la nostra attività antropica, se misurata con l'aumento della popolazione e una più equa giustizia sociale dei popoli, dovrebbe costantemente misurarsi con questi obiettivi.

Da questa premessa nasce la volontà nel 1999 di stabilire una stretta collaborazione con gli istituti austriaco e tedesco IBO e IBN. L'attività di certificazione di ANAB (Architettura Nazionale di Architettura Bioecologica) si svolge dal 2004 grazie ad un accordo con ICEA, istituto accreditato per la certificazione di prodotti biologici e naturali.

Si tratta di un sodalizio improntato su principi etici di indipendenza, regolamentato, che permette la valorizzazione dei prodotti ecologici per costruzione e arredo. ANAB fornisce gli standard di prodotto, mentre ICEA effettua le attività di certificazione e le verifiche sui materiali e sui processi produttivi.

4.4.2 Iter di certificazione per ottenere ed utilizzare il marchio "ANAB – Prodotto certificato per la bioedilizia"

La valutazione iniziale dei prodotti e processi produttivi si articola in tre diverse attività tra esse complementari: la valutazione della documentazione del prodotto da certificare, la valutazione dei prodotti ed esecuzione delle prove, la valutazione del Ciclo di Vita del Prodotto (LCA).

Dopo l'esame documentale, si procede alla verifica di ogni prodotto per cui è richiesta la certificazione, andando a controllare che risponda funzionalmente all'impiego dichiarato, non contenga sostanze pericolose per l'uomo e l'ambiente, sia stato ottenuto prevalentemente da materie prime facilmente rinnovabili e materie seconde e sia ottimizzato dal punto di vista ambientale lungo tutto il ciclo di vita. Il prodotto deve essere inoltre campionato ed analizzato in laboratorio qualificati per verificare la corrispondenza con quanto emerge dall'esame documentale sulle caratteristiche del prodotto oggetto dell'LCA.



Figura 4.4.2 Fasi del processo di certificazione ANAB-ICEA.

Dopo l'esame documentale e le prove di laboratorio sui campioni, si procede alla vera e propria Valutazione del Ciclo di Vita del prodotto, andando a quantificare gli impatti ambientali, calcolati su una serie di indicatori associati all'intero ciclo di vita, andando a definire il profilo ambientale del prodotto sottoposto ad esame.

La metodologia applicata è quella dell'LCA che si articola in quattro fasi principali:

- definizione dell'unità funzionale e dei confini del sistema sottoposto ad esame;
- analisi di inventario, nella quale si quantificano i flussi di materia ed energia lungo l'arco di vita del prodotto;
- analisi di impatto ambientale, nella quale i flussi di materia ed energia precedentemente individuati nella fase di eco-inventario vengono ordinati, classificati e aggregati con opportuni pesi in diverse categorie di impatto ambientale, tramite indicatori aggregati di impatto;
- interpretazione dei risultati valutando i risultati delle analisi di impatto ambientale andando ad individuare le aree di maggiore criticità e di potenziale ottimizzazione all'interno del suo ciclo di vita.

Il percorso ANAB viene valutato attraverso uno dei *software* applicativi più diffusi per la valutazione del ciclo di vita di prodotto, SimaPro, associato ai più recenti *database* relativi alla produzione dei materiali, ai trasporti ed ai sistemi energetici.

Successivamente allo studio di LCA si procede alla presentazione dei risultati a cui segue una verifica ispettiva dell'Ente di certificazione indipendente.

La presentazione dei risultati consiste in sintesi nella:

- descrizione del prodotto e del processo, dove vengono esplicate le caratteristiche tecniche del prodotto in termini di composizione, modalità di posa in opera, necessità di manutenzione, ecc.;
- definizione dell'unità funzionale per ciascun prodotto da certificare, ad esempio 1 kg di materiale, 1 m² di superficie; lo scopo dell'unità funzionale è quello di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita;
- definizione dei confini del sistema sono descritte le fasi del ciclo di vita del prodotto incluse nell'analisi (estrazione delle materie prime, trasporti, produzione del materiale; in questa fase vengono definiti anche i confini temporali e geografici inerenti al processo di produzione;
- profilo ambientale del prodotto viene definito attraverso una serie di indicatori che traducono in impatti potenziali il consumo di risorse, la produzione di rifiuti e l'emissione di sostanze inquinanti in aria ed in acqua associate al ciclo di vita del prodotto.

Le categorie di impatto considerate nella certificazione di ANAB sono:

1. Uso di risorse CED - *Cumulative Energy Demand* (MJ);
2. Effetto serra GWP - *Global Warming Potential* (kg CO₂eq);
3. Acidificazione AP - *Acidification Potential* (kg SO₂eq);
4. Eutrofizzazione EP - *Eutrophication Potential* (kg PO₄³⁻eq);
5. Riduzione ozono ODP - *Ozone Depletion Potential* (kg CFC-11 eq);
6. Ossidanti fotochimici POCP - *Photochemical Ozone Creation Potential* (kg C₂H₄ eq).

Segue una interpretazione e delle conclusioni tramite una analisi critica dei risultati, individuando le aree di maggiore criticità ambientale e di potenziale intervento.

A seguito di questa fase di studio segue una verifica ispettiva "in situ" che ha lo scopo di verificare la corretta organizzazione e gestione dei processi di fabbricazione e delle procedure interne suscettibili di compromettere la conformità del prodotto stesso ai requisiti definiti nello standard ANAB, attualmente in fase di accreditamento.

4.4.3 Standard ANAB

Lo scopo principale dello Standard per la Certificazione dei Materiali per la Bioedilizia è il seguente:

(a) Promuovere un costante miglioramento dei prodotti, dei processi e delle tecnologie che consenta di ridurre l'impatto ambientale in ogni fase del suo ciclo di vita, di migliorare livelli di salute e sicurezza negli ambienti di lavoro

(b) Tutelare l'utilizzatore finale riducendo tutti i possibili rischi per la salute e rendendo trasparente l'informazione ambientale sui materiali per la bioedilizia.

Vengono fissati i criteri generali per le materie prime, per le risorse vergini rinnovabili, per le risorse minerali, per i polimeri da fonti rinnovabili e per le risorse secondarie.

Importante elemento è anche quello di fissare i criteri relativi al processo produttivo, il controllo del processo produttivo e la sua valutazione ambientale.

Oltre ai requisiti tecnici minimi stabiliti dallo Standard, le Organizzazioni richiedenti la certificazione devono sottostare a:

- attenta gestione ambientale
- stoccaggio, imballaggio e trasporto del materiale
- tenuta dei registri e assicurazione interna della qualità
- gestione della compliance sociale
- sistema di assicurazione della qualità
- comportamento etico aziendale.

Recentemente è stata fatta una attenta analisi riguardo la conformità dello standard ai Criteri Ambientali Minimi (DM 11.10.2017) in vista del prossimo accreditamento dello schema di certificazione.

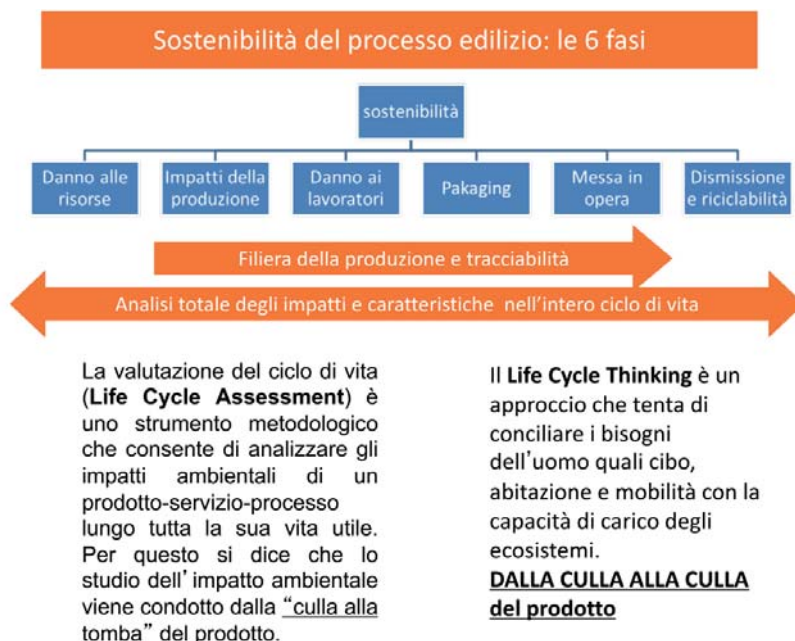
Particolare attenzione è stata posta nella definizione dei criteri per le materie prime da recupero o riciclo.

I 4 OBIETTIVI SULL'EVOLUZIONE DELLA CERTIFICAZIONE DEI MATERIALI SECONDO I NUOVI STANDARD ANAB

| | |
|--------------|---|
| Obiettivo 1: | Identificare i prodotti e le tecnologie rispetto al loro livello di sostenibilità |
| Obiettivo 2: | Esprimere la sostenibilità dei prodotti rispetto ad un sistema facilmente comprensibile a operatori e stakeholder |
| Obiettivo 3: | Far evolvere il concetto che esistono materiali (per categorie) che possono essere più sostenibili di altri e non esiste la sostenibilità unica |
| Obiettivo 4: | Sperimentare il sistema di classificazione progressiva stabilita dalla direttiva 2010/30/UE anche per la sostenibilità |

Figura 4.4.3 Obiettivi sull'evoluzione della certificazione dei materiali secondo i nuovi standard ANAB.

Figura 4.4.4 Fasi del processo edilizio e sostenibilità.



L'introduzione di materiale di scarto recuperato dai processi industriali o di rifiuti post-consumo, riduce la quantità dei rifiuti e la domanda di risorse naturali vergini. Vengono però poste alcune condizioni di uso dei materiali recuperati dai processi industriali o di materiali riciclati:

- non devono essere classificati come rifiuti pericolosi;
- le attività, i procedimenti e i metodi di recupero e riciclo dei materiali non devono costituire un pericolo per la salute dell'uomo e/o recare pregiudizio all'ambiente.

Per quanto riguarda i materiali da post-consumo un aspetto importante è quello della verifica del livello di sostanze inquinanti presenti derivati da vari trattamenti di finitura dei prodotti da cui provengono.

| Elemento o composto | Valore limite (mg/kg pannello secco) |
|---------------------|---|
| Arsenico (As) | 2 |
| Cadmio (Cd) | 2 |
| Cromo (Cr) | 25 |
| Rame (Cu) | 20 |
| Piombo (Pb) | 30 |
| Mercurio (Hg) | 0,4 |
| Fluoro (F) | 100 |
| Cloro (Cl) | 600 |
| PCP | 3 |
| Creosoto | Non presente |

Figura 4.4.5 Valori limite di sostanze pericolose.

4.4.4 Conclusioni

Si deduce che l'approccio nei materiali e nel bioarredo da oltre trent'anni per ANAB, è stato quello di avvalersi non solo della piena attuazione del *Life Cycle Assessment* (LCA), ma di fare il passo "oltre" ovvero verso la consapevolezza, attraverso processi di formazione e informazione, riguardo ai materiali che vengono utilizzati. In definitiva verso l'auspicato "pensiero del ciclo di vita", ossia il *Life Cycle Thinking* (LCT).

Percorso che entra in azione concretamente attraverso i decreti di questi ultimi anni sui Criteri Minimi Ambientali, cogenti nelle gare d'Appalto della Pubblica Amministrazione per quanto riguarda le opere edilizie e gli arredi per interni. La Pubblica Amministrazione che, grazie alla spinta europea, potrebbe diventare occasione di azioni virtuose di esempio anche per i privati cittadini.

Il contributo di ANAB continua. È in corso la volontà di esplicitare nei certificati, le risultanze fondamentali che fanno dei materiali, prodotti particolarmente attenti alla salubrità umana e all'economia circolare.

Vogliamo poter far certificare i buoni prodotti di qualità anche alle piccole aziende locali che contribuiscono alla crescita lenta ma inesorabile del "buon fare naturale".

Piccole realtà spesso avulse dai contesti di interessi mavive, concrete e portatrici sane di conoscenze e saperi reinventati nell'ottica dell'efficienza energetica e del benessere *indoor*.

Sostenendo quanto indicato da Thomas Rau, vogliamo andare ancora più in là, spingendoci verso la cosiddetta "Dichiarazione universale dei diritti dei materiali" contribuendo a livello internazionale, alla costituzione di un vero e proprio passaporto dei materiali.

Questo è il vero e proprio cambio di paradigma, che costringe tutti noi a prendere coscienza che un qualsiasi materiale che noi utilizziamo diventa una questione etica e pratica.

Thomas Rau nel suo ultimo lavoro "Materials Matters – L'importanza della materia" scrive che: "La nostra nuova economia si impernia sulla soddisfazione di tutti i bisogni dell'essere umano, se non saremo più limitati dal pensiero lineare e dalla lotta per appropriarsi delle materie prime scarse, ci si aprirà davanti la via verso una società solidale. E poiché la nostra identità non dipenderà più da ciò che abbiamo, presteremo attenzione a ciò che siamo: degli esseri spirituali che compiono un viaggio umano, ospiti di questa Terra."

Della stessa collana

Monica Lavagna, Serena Giorgi, Anna Dalla Valle, 2016. *Abitare in Europa. Analisi dei dati statistici, definizione di modelli rappresentativi e valutazione ambientale LCA del patrimonio residenziale europeo*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna (RN).

