

POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

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

Original

Embodied Carbon and Energy. Indicatori per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio / Giordano, R. - In: LCA IN EDILIZIA. Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia. Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni / Lavagna M.. - STAMPA. - [s.l.] : Maggioli Edizione Politecnica, 2022. - ISBN 9788891655806. - pp. 37-48 [10.30448/uni.916.55806.05]

Availability:

This version is available at: 11583/2976153 since: 2023-02-17T12:37:43Z

Publisher:

Maggioli Edizione Politecnica

Published

DOI:10.30448/uni.916.55806.05

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

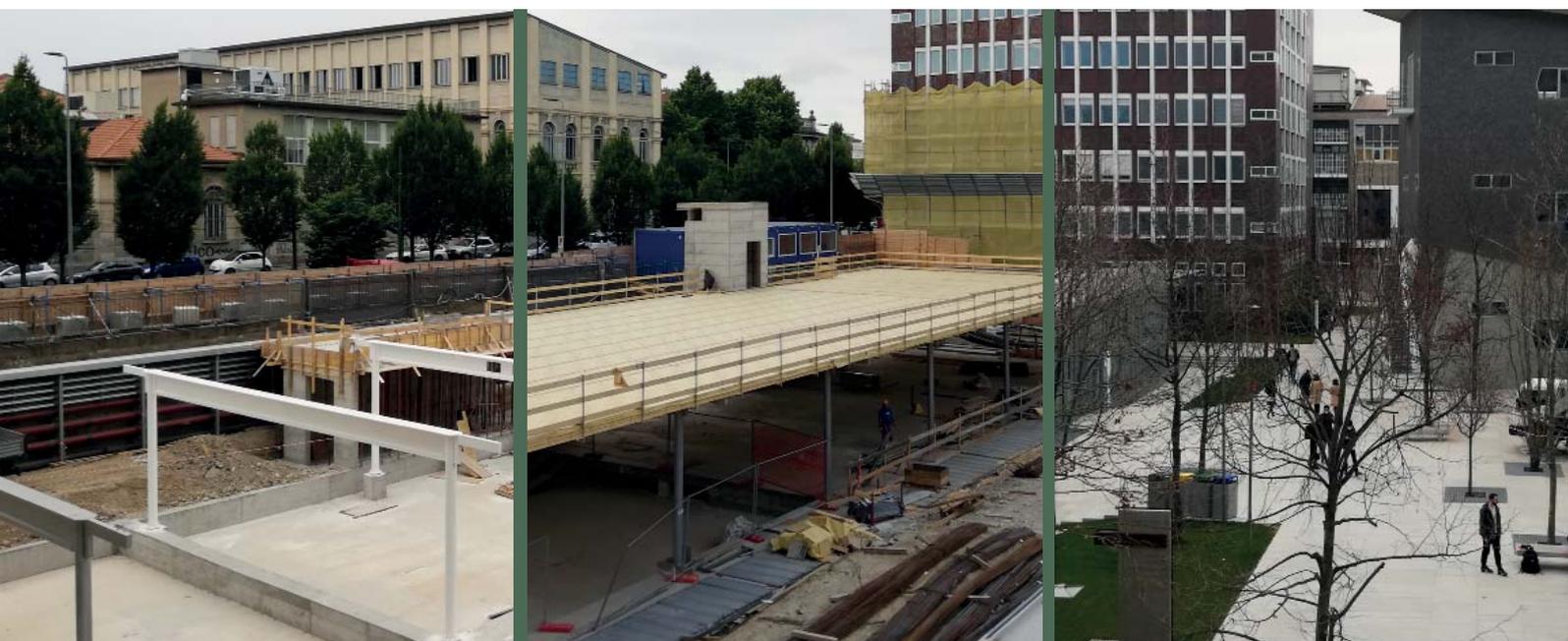
Publisher copyright

(Article begins on next page)

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, Cristina Mazzola, Alessia Medici, Elena Montacchini, Carol Monticelli, Elisabetta Palumbo, Sandra Persiani, Chiara Piccardo, 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.

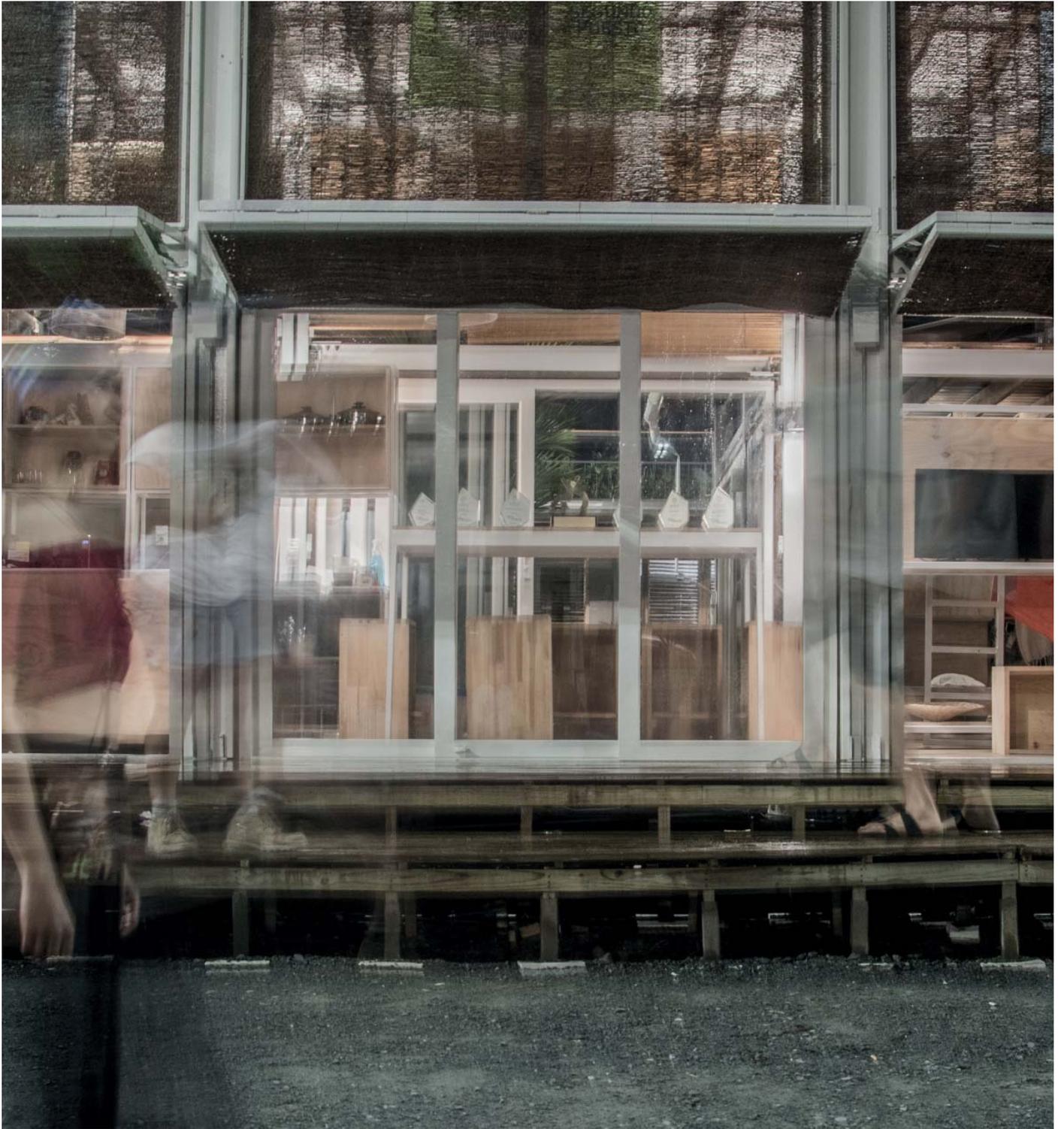
Il libro restituisce dunque questa ricchezza di punti di vista, di percorsi metodologici, di esplorazioni applicative. Ne deriva un quadro articolato e complesso, rappresentativo di alcuni dei principali temi trainanti oggi, proprio perché i singoli contributi restituiscono percorsi di ricerca avanzata. 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



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:

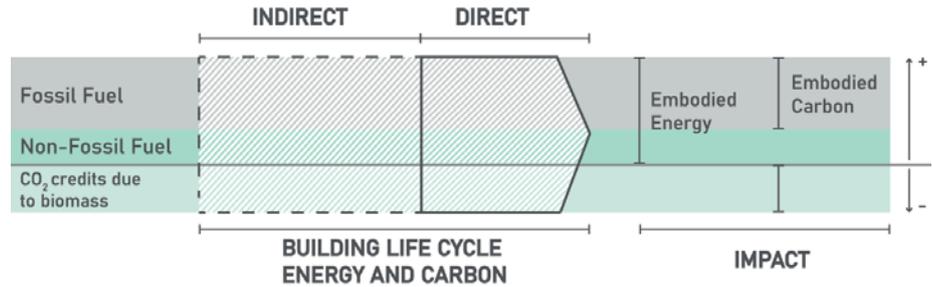
- 1) la crescita della consapevolezza delle persone in merito al consumo di fonti non rinnovabili e ai cambiamenti climatici;
- 2) la pianificazione urbana finalizzata a una migliore efficienza energetica e a un più ampio utilizzo delle fonti rinnovabili;
- 3) il miglioramento delle prestazioni energetiche 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.

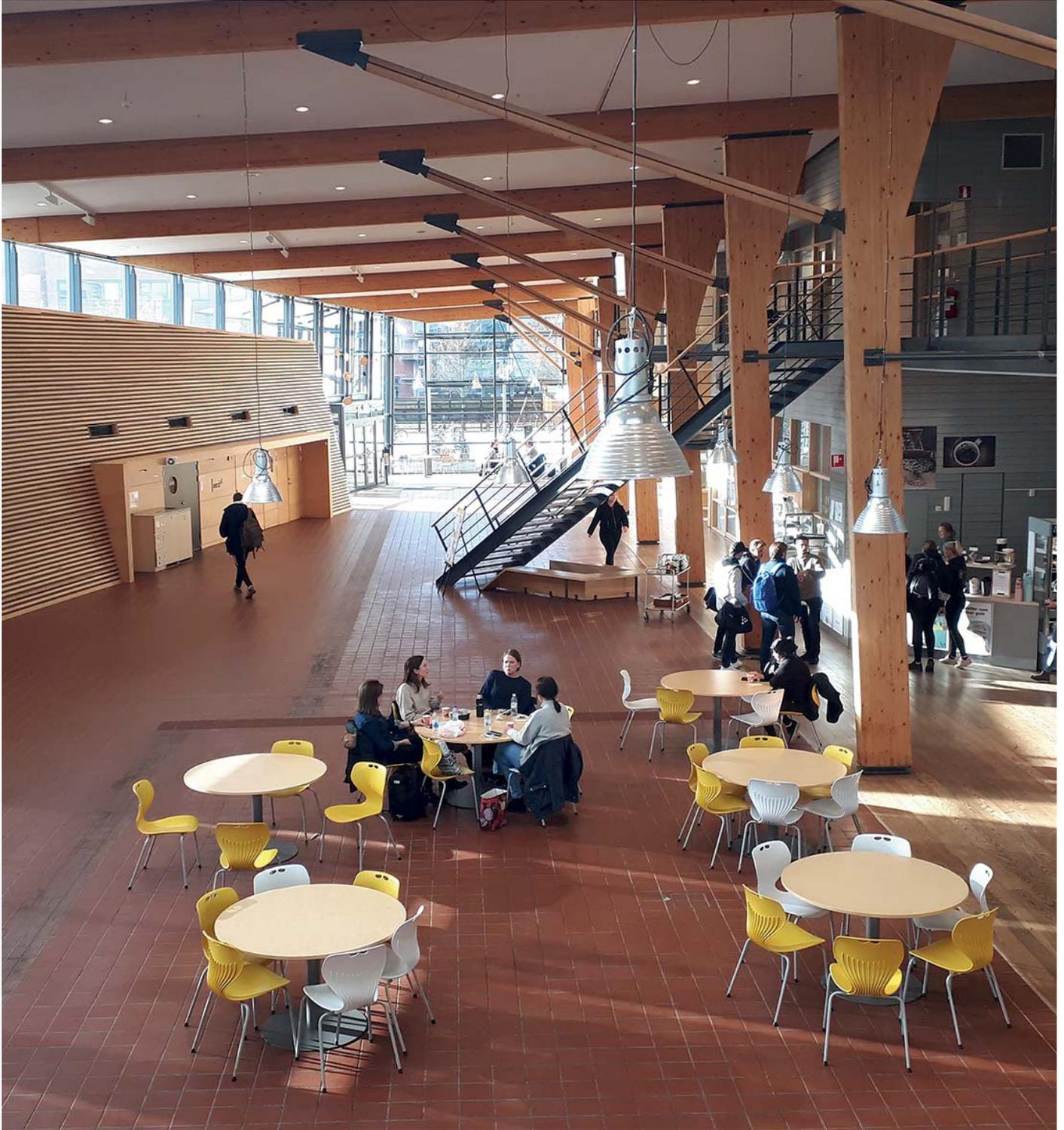
Un grazie particolare a Federica Gallina e Benedetta Quaglio per l'intenso lavoro di analisi delle informazioni e – soprattutto – per il costante supporto fornito nella definizione della metodologia di valutazione e nello sviluppo del modello di calcolo EURECA.

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.



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).

