LCA IN EDILIZIA

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









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'Assoociazione 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 certifi cazione 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 e 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

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

3. Progettazione Life Cycle

3.1	La progettazione del ciclo di vita in architettura	121
2.2	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	131
3.3	Modello parametrico integrato con LCA: proposta per un approccio	
٥.٥	metodologico di valutazione di impatto ambientale di architetture reversibili	
	temporanee	143
	Carol Monticelli, Alessandra Zanelli, Salvatore Viscuso, Cristina Mazzola	1 13
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 vita.

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.

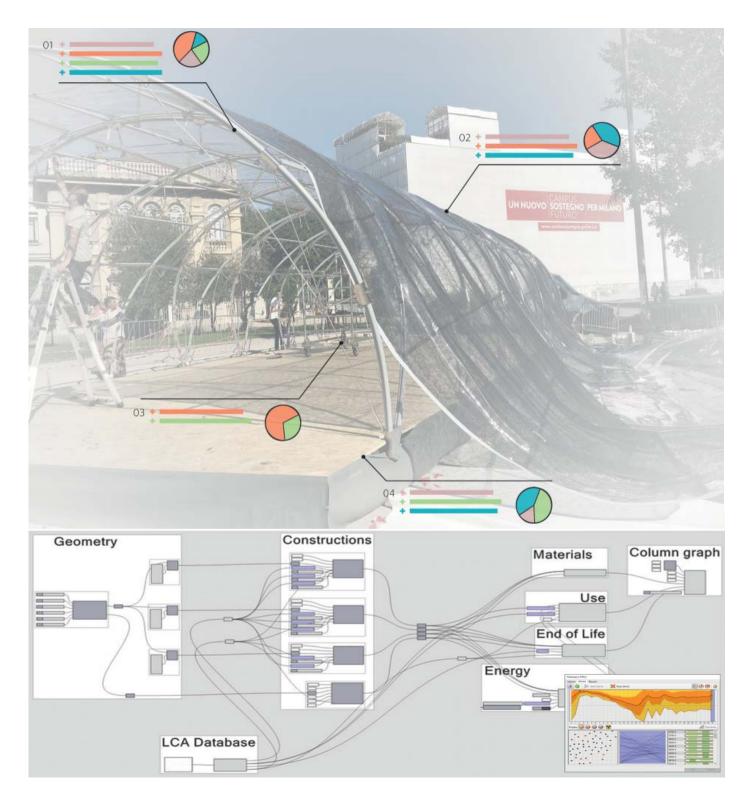
Il libro restituisce dunque questa ricchezza di punti di vista, di percorsi metodologici, di esplorazioni applicative. Ne deriva un quadro articolato e complesso, rappresentativo di alcuni dei principali temi trainanti oggi, proprio perché i singoli contributi restituiscono percorsi di ricerca avanzata.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



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 pervalutare 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 ali 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, guasi 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 metodogia sviluppata incorpora un'analisi LCA semplificata in un processo di progettazione basato sulla varaibile 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).

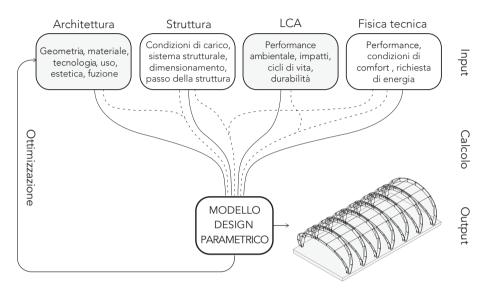


Figura 3.3.1 Flusso di lavoro schematico di un modello di progettazione parametrica che incorpora diverse specifiche di progetto (per es. architettura, analisi strutturale, LCA, aspetti della fisica dell'edificio) e interfacce (linee tratteggiate) durante il processo di progettazione. Le caselle grigie 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 <= 0,6);
- calcolo del secondo principio per il caso studio: [Peso dell'involucro (We) / Peso del sistema di fissaggio/interfaccia (Ws)] 75/27 = 2,78 (da verificare We / Ws> 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).

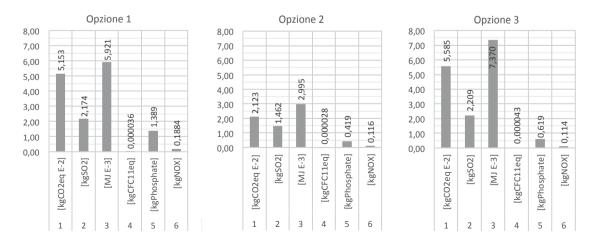
Dopo questa verifica preliminare un'analisi LCA è stata realizzata per tre soluzioni, in cui la forma è stata mantenuta fissa e sono cambiati solo i materiali e le dimensioni dei profili strutturali. Per verificare le proprietà tecniche delle tre soluzioni strutturali con differenti materiali si è fatta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

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.

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).

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	kgCO2eq	515.345	212.255	558.510
2	Acidification	kgSO2	2.174	1.463	2.210
3	Depletion of Non-Ren. Energy	MJ	5921.177	2994.661	7370.431
4	Ozone Depletion Potential	kgCFC11eq	0.000036	0.000028	0.000043
5	Eutrophication	kgPO4	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'ecoefficienza, 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	OPZIONE3 GFRP ibrido
PROCESSO PRODUTTIVO	Impatto ambientale	• •	•	• •
	Rifiuti di produzione	•	• • •	•
FASE DI TRASPORTO	Stoccaggio - volume	• •	• • •	•
	Peso	• •	• • •	•
PROCESSO DI MESSA IN	Necessità di attrezzature	• •	• • •	•
OPERA	Expertise di operatori specia	alizzati • •	• •	•
	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 sequente (1):

Funzione fitness:
$$\sigma_{\rm X}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\,{\rm X}_{i}-\overline{\rm X}\,\right)^{2}}{N}}\cong0$$
 (asintoticamente uguale a 0) (1)

 $\times_N < \times_{N+1}$

 $\sigma_{\times} = Deviazione standard$

 $x_i = risultatiLCA$ per ognicategoria di impatto / Num. di cicli di riuso $\overline{x} = Valore$ di riferim. (-20% dei risultati di impatti LCA per il caso monouso; -40%;...) N = 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.

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

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

		Basa	Basamento		Struttura		Involucro	
Cat. di impatto	U.d.M.	Travi GFRP	Pannelli OSB	Tubi GFRP	Cavi acciaio inox	Giunti acciaio inox	Telo PVC Crystal	Totale (uso singolo)
Global Warming Potential	[kgCO2eq]	5840.275	13.659	3607.223	817.695	1210.690	4623.434	16112.976
Acidification	[kgSO2]	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	[kgCFC11eq]	0.000486	1.7705e-6	0.000300	0.000044	0.000064	0.000060	0.000956
Eutrophication	[kgPO4]	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)					
Component		-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	
	$\sigma_{ imes}$	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 Stuttgard.
- 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/.
- Quarzt 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.