

VALUTAZIONE LCA DI UN EDIFICIO REALIZZATO CON CONTAINER PER TRASPORTI MARITTIMI RIUSATI

Serena Giorgi^{1*}, Monica Lavagna¹, Elisabetta Ginelli¹

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito.

Sommario – Il settore edilizio, essendo tra i settori economici con la maggiore produzione di rifiuti e consumo di risorse, è sempre di più oggetto di interesse nelle politiche di economia circolare promosse dall'Unione Europea, diventando campo di sperimentazione per pratiche di recupero di materiali che mirano alla chiusura dei flussi materici. In questo contesto di ricerca per soluzioni innovative di circolarità, è necessario dotarsi di strumenti di supporto utili alla valutazione degli effettivi benefici ambientali conseguibili lungo il ciclo di vita di un prodotto. Il contributo mostra come la valutazione *Life Cycle Assessment* (LCA) possa essere uno strumento utile al controllo e alla quantificazione degli impatti ambientali correlati all'applicazione di strategie volte alla circolarità di flussi materici. L'oggetto dello studio LCA presentato in questo articolo è il prototipo ad uso residenziale progettato e realizzato all'interno del progetto di ricerca "cHOMgenius. PrototypeSystem&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", finanziato dal bando SmartLiving di Regione Lombardia. Il progetto prevede il riutilizzo di container per trasporti marittimi, arrivati a fine vita utile nel settore commerciale, come struttura portante di edificio e l'applicazione di tecniche costruttive reversibili per tutte le parti d'opera. Il prototipo rappresenta quindi un esempio di applicazione di economia circolare nel settore edilizio in quanto, allungando la vita dei moduli di container e garantendo la disassemblabilità delle componenti edilizie, riduce il consumo di risorse e la generazione di rifiuti nella fase di costruzione e demolizione. Il contributo restituisce gli aspetti metodologici e gli esiti dell'analisi LCA condotta, evidenziando gli impatti e i benefici ambientali ottenuti attraverso sia il riuso di materiali e componenti sia l'impiego di tecnologie a secco per le parti di involucro e di completamento. I risultati vengono confrontati con un edificio *Baseline*, ovvero che utilizza gli stessi materiali ma con profili ambientali non ottimizzati dal punto di vista ambientale, e con un edificio *Business as Usual*, ovvero uno stesso edificio realizzato con soluzioni costruttive convenzionali, a parità di prestazione.

Parole chiave: *life cycle assessment, settore edilizio, economia circolare, riuso, disassemblaggio*

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A BUILDING BUILT WITH REUSED SHIPPING CONTAINERS

Abstract – The construction sector, one of the economic sectors with the highest production of waste and consumption of resources, is increasingly an area of interest

for European circular economy policies, becoming a field for experimenting with materials recovery practices aimed at closing the cycle of materials. In this context of research towards innovative circular solutions, it is necessary to equip with supporting tools useful for evaluating the actually achievable environmental benefits across the product life cycle. The paper shows the Life Cycle Assessment (LCA) as a useful tool to control and quantify the environmental impact related to the application of strategies aimed at the circularity of material flows. The object of the LCA study is the residential prototype designed and built within the research project "cHOMgenius. PrototypeSystem&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", funded by the SmartLiving call of Lombardy Region. The prototype is based on the reuse of shipping containers, which have reached the end of their useful life in the commercial sector, for the bearing structure of a building, and the application of reversible construction techniques. The prototype is an example of circular economy application in the building sector: by extending the life of containers modules and ensuring the disassembly of building components, it reduces the consumption of resources and the generation of construction and demolition waste. The paper deals with the methodological aspects and the results of the LCA study, highlighting the environmental impacts and benefits achieved by materials and components reuse and the use of dry technologies for the envelope and completion parts. The results are compared with a *Baseline* scenario, which considers the same materials but with environmental profiles not optimized from an environmental point of view, and with a *Business as Usual* scenario, which considers the same performance building built with conventional construction solutions.

Keywords: *life cycle assessment, building sector, circular economy, reuse, disassembly*

Ricevuto il 15-4-2021. Correzioni richieste il 31-5-2021. Accettazione il 5-7-2021.

1. INTRODUZIONE

1.1. Circolarità in edilizia e valutazione della sostenibilità ambientale

Il settore edilizio, a livello europeo, è responsabile del 35% della generazione di rifiuti e del 50% del consumo di materie prime (Eurostat, 2016), di conseguenza esso rappresenta un settore prioritario per l'attivazione delle politiche di economia circolare, recentemente riproposte attraverso un nuovo piano d'azione, all'interno degli obiettivi del Gre-

* Per contatti: Via Ponzio 31, 20133 Milano. Tel. 02.23995134. E-mail: serena.giorgi@polimi.it

en Deal europeo (COM 98, 2020). Tali politiche mirano a promuovere i principi di circolarità lungo l'intero ciclo di vita degli edifici: 1) incentivando il contenuto di riciclato nei prodotti da costruzione; 2) migliorando la durabilità e l'adattabilità degli edifici; 3) integrando la valutazione del ciclo di vita negli appalti pubblici utilizzando il progetto pilota di comunicazione volontaria Level(s); 4) riformulando gli obiettivi di recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione prefissati dalla Waste Framework Directive 2008/98/CE.

Al fine di diffondere un approccio al ciclo di vita degli edifici e criteri di sostenibilità e circolarità in Italia, stanno agendo come importante leva legislativa i Criteri Ambientali Minimi (CAM), definiti dal D.M. 6/11/2017 n. 259 e applicati dal D.Lgs 50/2016, art. 34, relativo ai Green Public Procurement. Tra i molti criteri obbligatori previsti dai CAM, vengono promossi requisiti strettamente correlati ai principi di circolarità enunciati dagli strumenti di indirizzo a livello europeo, come i requisiti di disassemblaggio, di demolizione selettiva degli edifici a fine vita, di riutilizzo e riciclo di materiali e di componenti edilizi. Ad esempio, viene richiesto che almeno il 50% del peso totale dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati possa essere disassemblabile e quindi che possa garantire, a fine vita, la demolizione selettiva e l'avvio dei materiali ad un processo di riuso o riciclo. Inoltre, viene richiesto che l'edificio contenga almeno il 15% in peso di materia recuperata o riciclata. Particolarmente interessante sono poi i criteri di verifica previsti dai CAM, che stimolano l'utilizzo di certificazioni che rendono trasparente il profilo ambientale *Life Cycle* di un prodotto, promuovendo, ad esempio, le etichette ambientali di tipo III conformi alla norma UNI EN 15804, tra cui rientrano le *Environmental Product Declaration* (EPD) che dichiarano le prestazioni ambientali di un prodotto mediante una valutazione *Life Cycle Assessment* (LCA).

In questo contesto, dunque, nel settore edilizio è determinante investigare e sperimentare strategie di progettazione con approccio *Life Cycle Thinking* e soluzioni costruttive che rispettino i requisiti di circolarità e, quindi, siano modulari, disassemblabili, prefabbricate, che contengano materiali e componenti provenienti da un precedente ciclo di vita utile concluso e che, a loro volta, possano trovare a fine vita una rivalorizzazione attraverso pratiche di riuso e riciclo. Queste sperimentazioni introducono nuove tecniche costruttive, nuove procedure operative ed organizzative e nuove relazioni tra operatori lungo il processo edilizio.

Operare in un campo di innovazione richiede, in modo particolare, il supporto di strumenti *Life Cycle* utili al controllo e alla quantificazione dei reali benefici ambientali che dette tendenze possono trarre. Anche in letteratura viene evidenziata la necessità di valutazioni quantitative che dimostrino i benefici delle strategie di costruzione circolare, anziché concentrarsi solo su criteri qualitativi (Buyle et al. 2019).

La valutazione della sostenibilità ambientale attraverso strumenti standardizzati come il *Life Cycle Assessment* (EN 15978:2011) diventa quindi centrale per promuovere soluzioni non solo circolari ma anche sostenibili lungo il ciclo di vita, soluzioni, quindi, che non portino apparentemente benefici ambientali in una sola fase del ciclo di vita, spostando però gli impatti ambientali ad altre fasi. Ad esempio, la scelta di riutilizzare componenti giunti alla fine della prima vita utile, deve essere subordinata alla valutazione degli impatti provocati dal trasporto necessario per il loro reperimento, così come degli impatti causati da eventuali pratiche di trasformazione necessarie per permetterne il secondo impiego. Altro esempio riguarda le scelte di materiali e soluzioni tecnologiche specifiche, che devono essere motivate da valutazioni con approccio al ciclo di vita che considerino anche gli aspetti di durabilità, quindi valutando non solo l'impatto di produzione ma anche quello di manutenzione e sostituzione. Al tempo stesso soluzioni innovative vanno valutate anche rispetto gli altri ambiti di sostenibilità, ovvero nella sfera economica e sociale.

Il presente articolo vuole restituire un esempio di applicazione della valutazione LCA in un caso di sperimentazione edilizia volta al raggiungimento di particolari requisiti di circolarità, mettendo in evidenza la quantificazione dei benefici ambientali che le scelte progettuali adottate riescono a trarre rispetto a scenari alternativi.

1.2. Applicazione della valutazione LCA: il caso studio

Al fine di applicare la valutazione LCA su un caso di edilizia circolare e reversibile, lo studio prende come oggetto un prototipo ad uso residenziale realizzato con container riusati, sviluppato all'interno del Progetto "cHOMgenius. Prototype System&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", finanziato dal Bando Smart Living di Regione Lombardia, con Partner BFC Sistemi, Whiteam, DABC Politecnico di Milano (team coordinato dalla Prof.ssa Elisabetta Ginelli, in quali-

tà di responsabile scientifico), e supportato da 20 aziende nazionali ed internazionali¹, assieme a UNI. Il prototipo ad uso residenziale cHOMgenius è particolarmente interessante in quanto si basa sul riutilizzo di container marittimi come struttura portante di edificio, e prevede soluzioni tecnologiche a secco completamente disassemblabili (per ulteriori approfondimenti si rimanda all'articolo "CHOMGENIUS come esempio di smart shipping container building, tra economia circolare e innovazione", autori: E. Ginelli, G. Pozzi, G. Vignati, riportato nel presente volume della rivista "Ingegneria dell'Ambiente"). Il riutilizzo in edilizia di container giunti a fine vita utile nel settore dei trasporti marittimi è possibile in quanto un certo numero degli stessi non viene dismesso perché usurato o danneggiato ma viene abbandonato nei centri intermodali ancora in ottimo stato, in quanto risulta economicamente svantaggioso far rientrare container vuoti nel paese di origine, dal quale erano giunti carichi di merce.

In particolare, la struttura portante del prototipo è realizzata mediante il riuso di quattro container (denominati rispettivamente HC1, HC2, HC3, HC4) raggruppati in due moduli costituiti da due container sovrapposti ciascuno, connessi tra loro mediante un blocco centrale di nuova costruzione (denominato SA1, SA0), adibito a locale tecnico ed ingresso principale, con vano scale per il collegamento verticale. I container, che formano una struttura senza richiedere strutture portanti aggiunte, poggiano su una fondazione in acciaio realizzata a secco; il blocco di nuova costruzione è costituito da una struttura portante a telaio in acciaio (Figura 1). La maggior parte dei materiali utilizzati per la realizzazione del prototipo hanno contenuto di riciclato e le connessioni delle parti sono standardiz-

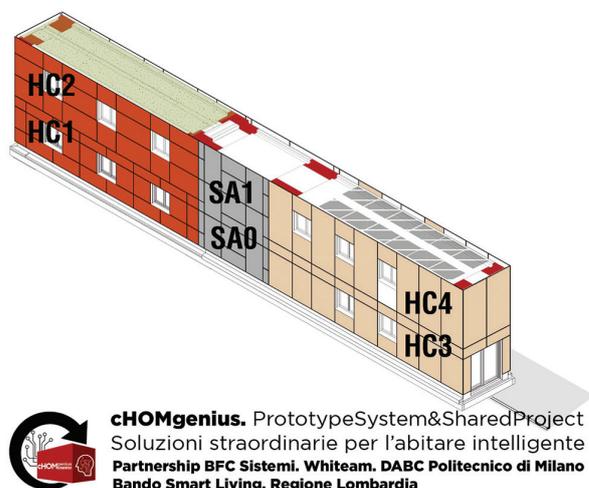


Figura 1 – Prototipo cHOMgenius

zate e basate su giunti meccanici che assicurano tempi di assemblaggio controllati. Le tecniche realizzative, completamente a secco, la modularità dei sistemi dimensionali, strutturali e impiantistici, garantiscono flessibilità costruttiva e spaziale e un facile disassemblaggio a fine vita, che offre la possibilità di riutilizzo e riciclo delle singole parti.

Esistono molti vantaggi nell'uso di container nel settore edilizio, legati in particolare alle elevate prestazioni meccaniche dei container stessi, alla loro resistenza agli agenti atmosferici, alla modularità e alla semplicità di assemblaggio e disassemblaggio. La durabilità dell'acciaio corten, di cui è costituito il container, garantisce inoltre una riduzione di ulteriori impatti di manutenzione durante la fase d'uso dell'edificio, consentendone l'allungamento della vita utile. Essendo una tecnologia costruttiva basata sulla prefabbricazione, va considerato inoltre il beneficio della riduzione dei rifiuti da costruzione (Jaillon et al., 2014) e dei tempi stessi di costruzione.

Il presente studio LCA riporta una valutazione sull'impiego dei container riusati in ambito edilizio, attraverso l'applicazione del metodo *Life Cycle Assessment*, dimostrando i potenziali benefici del riutilizzo rispetto al riciclo, allineandosi per approccio metodologico ad alcuni studi già presenti a letteratura (Dara et al., 2019; Islam et al., 2016; Santola et al., 2020; Tavares et al., 2019) e costituendo un contributo originale, data la localizzazione geografica dell'analisi (focalizzata su un caso studio italiano, a differenza degli altri studi a letteratura riguardanti casi extra-europei) e le analisi comparative effettuate tra la scelta di riuso abbinato a scelte costruttive disassemblabili e tecniche edilizie convenzionalmente utilizzate sul territorio nazionale italiano.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Obiettivo dello studio LCA e unità funzionale

L'obiettivo dello studio LCA è quello di valutare l'impatto ambientale del prototipo cHOMgenius al fine di evidenziare gli impatti evitati dalle scelte di progetto in merito al riuso di container e alla scelta di acciaio riciclato anziché vergine, per la struttura portante del prototipo, e per quantificare gli impatti di soluzioni costruttive reversibili associate al riuso dei container a confronto di soluzioni convenzionali. L'unità funzionale assunta per la valutazione LCA è l'intero prototipo, la reference service life è considerata pari a 50 anni.

Lo studio LCA si pone, inoltre, l'obiettivo di evidenziare la riduzione degli impatti determinati dall'uso di acciaio riusato o riciclato nel progetto, in particolare utilizzato per la struttura portante (incluso i container, i relativi giunti di collegamento e la parte strutturale aggiuntiva centrale SA0 SA1 di connessione ai moduli). Vengono, quindi, definiti diversi scenari, al fine di poter comparare la scelta di progetto (container riusati e acciaio da riciclo) con una situazione *Baseline* (container di nuova produzione e acciaio vergine) e scenari intermedi tra i due. In particolare, gli scenari analizzano l'utilizzo di container di nuova produzione (prodotti da acciaio vergine) oppure il riuso di container dismessi nel settore dei trasporti marittimi, e diverse opzioni di produzione di acciaio: acciaio vergine, acciaio con una percentuale di riciclato pari al 59% (pari alla media europea dichiarata dagli studi LCA dell'International Iron & Steel Institute e riportata nel database Inventory of Carbon & Energy) e acciaio riciclato al 100%. In particolare, la combinazione dei diversi scenari è la seguente:

- Scenario di progetto (prototipo cHOMgenius): container riusati e acciaio 100% riciclato;
- Scenario 1: container nuovi e acciaio 100% riciclato;
- Scenario 2: container riusati e acciaio 59% riciclato;
- Scenario 3: container nuovi e acciaio 59% riciclato;
- Scenario 4: container riusati e acciaio vergine;
- Scenario 5 (*Baseline*): container nuovi e acciaio vergine.

Un ulteriore obiettivo è quello di quantificare effettivamente la riduzione degli impatti ottenuta dalle soluzioni di progetto (prototipo cHOMgenius), realizzate con tecnologie costruttive prefabbricate, a secco, disassemblabili, rispetto a quelle di un edificio *Business as Usual* realizzato con tecnologie convenzionali. A tal fine è compiuta una valutazione LCA comparativa tra le soluzioni di progetto e soluzioni BAU dei seguenti sottosistemi tecnologici: chiusura orizzontale inferiore, suddividendo l'incidenza della fondazione e del solaio contro terra; chiusura orizzontale superiore; chiusura verticale opaca.

2.2. Confini di sistema e indicatori di impatto considerati

La metodologia LCA (EN 15978:2011) articola il ciclo della vita di un edificio in varie fasi: produzione dei materiali (A1-A3), costruzione (A4-A5), uso (B1-B7) e fine vita (C1-C4). Il presente studio LCA

considera un confine di sistema from cradle to site, considerando quindi gli impatti ambientali relativi all'estrazione delle materie prime (A1), al trasporto dal sito di estrazione al sito di produzione (A2), al processo produttivo (A3) e il trasporto del prodotto dal luogo di produzione al sito di costruzione (A4). Questo studio LCA non considera gli impatti di fine vita, in quanto, applicando il metodo di allocazione degli impatti *cut-off secondo le norme EN 15978 e EN15804*, si ipotizza che gli stessi siano vicino allo zero, poiché il prototipo oggetto di valutazione è interamente disassemblabile (requisito fondamentale di progetto) e, di conseguenza, è previsto che a fine vita tutti i componenti e i materiali saranno riusati, oppure eventualmente riciclati, evitando totalmente il conferimento in discarica (eventuali impatti di riciclo non andrebbero comunque conteggiati nella prima vita, secondo il metodo *cut-off*, perché allocati al prodotto ottenuto dal riciclaggio).

La fase d'uso non è stata considerata, perché si è voluta concentrare l'attenzione sul ruolo delle scelte costruttive finalizzate alla circolarità dei materiali da costruzione; si sottolinea che comunque la progettazione è stata finalizzata alla realizzazione di uno Zero Energy Building *off grid*, quindi autosufficiente dal punto di vista energetico. Va sottolineato che questo comporta una significativa incidenza degli impianti nella valutazione LCA dell'edificio nelle fasi A1-A3 per la rilevante presenza di pannelli fotovoltaici, che però determinano poi un impatto pressoché nullo della fase d'uso B6 (*operational energy*).

Gli indicatori d'impatto considerati per la valutazione from cradle to site del prototipo sono il *Global Warming Potential* (GWP), espresso in kgCO₂eq (*Embodied Carbon*), e il *Total Primary Energy*, dato dalla somma di *Total use of Renewable Primary Energy resources* (PERT) e di *Total use of Non Renewable Primary Energy resources* (PENRT), espresso in MJ (*Embodied Energy*). Sono stati scelti questi due indicatori in quanto risultano maggiormente richiamati nelle attuali norme e direttive europee (European Green Deal, decarbonizzazione, Zero Energy Buildings).

2.3. Inventario dei materiali e fonte dati ambientali

L'inventario dei materiali edilizi (*foreground data*) di cui è composto il prototipo contiene i dati relativi alle voci di capitolato di progetto ed esplicita le quantità, espresse in chilogrammi, di ogni materiale/componente. Raggruppando per tipologia di ma-

teriale, si può evidenziare che il 50% del peso totale dell'edificio è rappresentato dall'uso dell'acciaio (comprendente i container), il 25% è costituito dagli isolanti, e a seguire, il 12% da materiali compositi, il 4% da alluminio, il 4% da materiali in legno e il 5% da altro, ovvero da materiali vari di minori quantità (Tab. 1). Al fine di restituire una lettura critica dei risultati LCA, l'inventario dei materiali edilizi è stato articolato per subsistema di edificio: struttura portante, chiusura verticale, chiusura orizzontale inferiore, chiusura superiore, partizioni interne verticali, partizione interna orizzontale e impianto di fornitura servizi. L'inventario comprende inoltre l'informazione relativa alla distanza dal luogo di produzione all'area di progetto, espressa in chilometri. I dati sulle quantità di ogni materiale e sulle distanze tra l'azienda produttrice e il cantiere sono stati comunicati direttamente dal responsabile del team di ricerca progettuale.

I valori dei profili ambientali di ogni materiale sono stati tratti da fonti primarie, attraverso certificazioni ambientali EPD dei prodotti utilizzati per la realizzazione del prototipo cHOMgenius, oppure da fonti secondarie, quali EPD di prodotti similari a quelli realmente utilizzati o banca dati Inventory of Carbon & Energy (ICE), Ökobaudat, Ecoinvent, che restituiscono dati medi di impatto. Per i materiali non dotati di EPD specifica, è stata effettuata una raccolta di tutti i dati ambientali disponibili provenienti da EPD di prodotti analoghi, dal database ICE, Ökobaudat e Ecoinvent, al fine di confrontare i dati rilevati e, una volta convertiti ed eguagliati ad un'unica unità funzionale, assumere quello più rappresentativo e corrispondente al materiale di progetto.

In particolare, per gli acciai sono stati utilizzati i profili ambientali della banca dati ICE, utilizzando le diverse percentuali di contenuto di riciclato, così da poter comparare i diversi scenari progettuali. Anche per i valori di impatto dei container nuovi (scenari 1, 3 e 5) è stato considerato il *dataset* dell'acciaio vergine di ICE, verificato che l'EPD di un acciaio corten ha valori molto simili a detto acciaio vergine di ICE. I valori di impatto dei container riusati (scenari di Progetto, 2 e 4), trattandosi di riuso senza la necessità di riadattamento dimensionale, sono stati considerati nulli, adottando le assunzioni già presenti in letteratura (Islam et al., 2016; Tavares et al., 2019); è importante sottolineare, però, che sono stati considerati gli impatti relativi al trasporto (A4) dei container riusati, in quanto provenienti da una distanza di 155 km dall'area di progetto.

Tabella 1 – Inventario dei materiali e relative quantità

	Materiale	Quantità [kg]
Acciaio	Acciaio Strutturale S355	10.740,01
	Struttura in acciaio 345 corten	16.528,00
	Acciaio verniciato	375,00
	Acciaio inox	10,15
	Acciaio zincato	194,77
	TOTALE ACCIAIO	27.847,92
Alluminio	Alluminio strutturale	805,25
	Lamiera piegata in alluminio	1.375,95
	TOTALE ALLUMINIO	2.181,20
Compositi	Fibrocemento	2.972,82
	Laminato	1.843,33
	Membrana per barriera al vapore	32,79
	Tenda in fibra di vetro e PVC	22,21
	Geotessili e sostanze organiche	1.195,85
	Membrana impermeabilizzante	800,49
	Materassino fonoassorbente	5,58
	TOTALE COMPOSITI	6.873,07
Isolante	Stuoia in gomma riciclata	114,73
	Vetro cellulare	13.335,00
	lana di roccia	23,09
	EPS	167,10
	XPS	18,19
	TOTALE ISOLANTE	13.658,11
Legno	Compensato marino	788,75
	OSB	837,78
	Legno tamburato	12,60
	Legno multilaminare verniciato	675,28
	TOTALE LEGNO	2.314,41
Altro	TOTALE ALTRO	2.895,71

Nella valutazione LCA per i materiali a base di legno non è stato conteggiato il beneficio dato dallo stoccaggio di CO₂, che avviene durante la crescita dell'albero dal quale proviene la materia prima legno, che se considerato generalmente compensa e supera gli impatti di produzione, portando il valore di impatto in negativo. Se incluso lo stoccaggio di CO₂ occorrerebbe, però, mettere nel bilancio l'eventuale incenerimento a fine vita del legno, che determinerebbe il rilascio della CO₂ stoccata inizialmente. Per questa ragione, si è ritenuta più ragionevole assumere i dati di ICE, che non considerano l'assorbimento della CO₂ dell'albero.

Per i profili ambientali di isolanti, materiali compositi, componenti in alluminio, vetri e altri elementi aggiuntivi non dotati di EPD specifica di prodotto, sono stati assunti i valori di Ökobaudat,

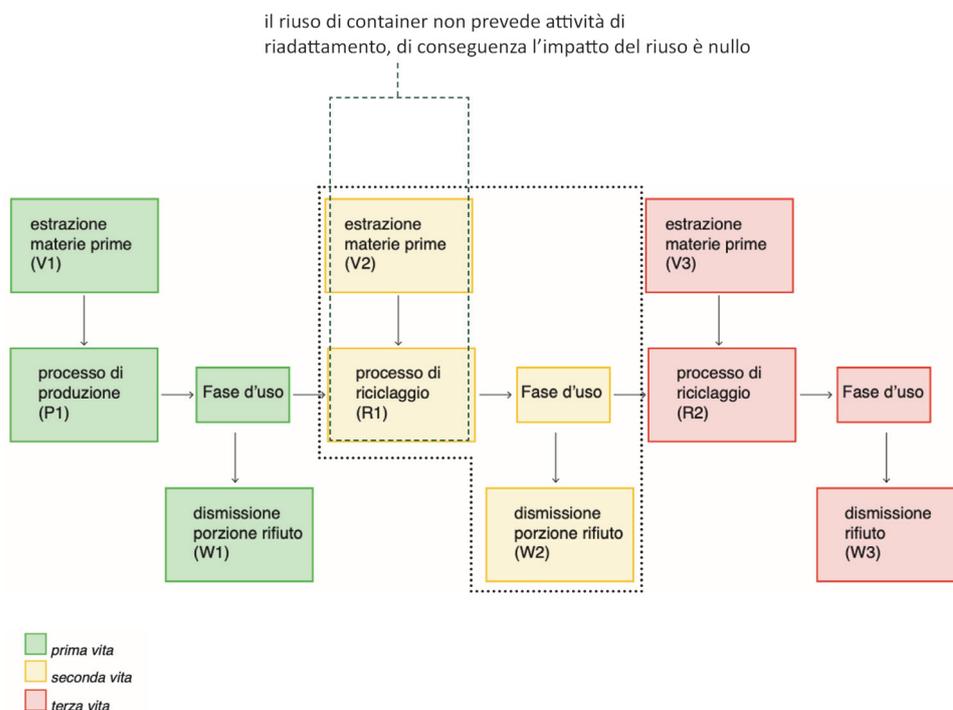


Figura 2 – Schematizzazione del metodo di allocazione *cut-off* adottato dallo studio LCA

poiché tale database fornisce descrizioni specifiche delle caratteristiche tecniche dei prodotti e dei relativi processi produttivi analizzati; pertanto, è stato possibile scegliere il *dataset* appartenente al materiale più assimilabile a quello utilizzato nel progetto.

Per quantificare l'impatto del trasporto è stato utilizzato il *dataset* da banca dati Ecoinvent associato ad un camion con capacità pari a 16 tonnellate di materiale.

2.4. Metodo di allocazione degli impatti tra prima e seconda vita

Per determinare l'allocazione degli impatti tra la prima e la seconda vita dei prodotti, è stato adottato il metodo di allocazione *cut-off*, identificato anche come metodo 100-0, che appartiene al *partitioning approach* (Giorgi et al., 2017). Il *cut-off* è un metodo *input oriented*, ovvero che privilegia la valutazione degli impatti che si sono verificati all'interno dei confini di sistema modellato, assegnando gli impatti direttamente al prodotto che li genera. Nel metodo *cut-off* (Fig. 2), quindi, sono totalmente assegnati alla prima vita del prodotto i carichi ambientali dovuti a: estrazione di materia prima vergine (V1), processo di produzione (P1), prima fase d'uso e smaltimento della porzione dei rifiuti (W1); alla seconda vita invece vengono attribuiti gli impatti causati da processo di riciclaggio/riuso (V3+R2), seconda fase d'uso e smaltimento (W3). Di conseguenza nella valutazione LCA la premialità del ridotto impatto ambientale dovuta al riuso e al riciclo di materiali viene attribuita alla seconda vita, per cui i materiali riusati o riciclati presentano generalmente minori impatti rispetto alla produzione da materie prime vergini perché vengono considerati gli impatti del solo trasporto e delle rilavorazioni.

Tale metodo *cut-off* è condiviso dal settore delle costruzioni, adottato dalla norma EN 15804:2014, riguardante le dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD), e dalla norma EN 15978:2011, riguardante la valutazione della prestazione ambientale degli edifici. Infatti, nel contesto edilizio, in cui la lunga durata di vita di un edificio rende difficoltosa la quantificazione di un impatto evitato dalla riciclabilità futura del materiale, che avverrebbe dopo i molti anni di vita utile dell'edificio, è preferibile premiare il presente contenuto di riciclato, che risulta essere un dato oggettivamente misurabile.

Nel presente studio, in coerenza, non sono stati considerati i benefici derivanti dal potenziale riuso e riciclo dei materiali a fine vita (che cadrebbero nel modulo D, al di fuori dei confini di sistema), ma si sono comunque considerati nulli gli impatti di fine vita in quanto non vi è un conferimento in discarica, ma a un centro di riciclo/riuso. Gli unici impatti saranno quelli di disassemblaggio e trasporto, considerati trascurabili.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Impatti LCA della fase di produzione (A1-A2-A3)

I primi risultati dello studio LCA hanno restituito gli impatti ambientali analizzati relativi alla fase di produzione (A1-A3) dello Scenario di Progetto. Esso mostra un impatto complessivo del prototipo per la fase di produzione pari a $6,91+04 \text{ kg/CO}_2\text{eq}$ di *Embodied Carbon* e a $1,47\text{E}+06 \text{ MJ}$ di *Embodied Energy*. Da detta analisi LCA si evince inoltre l'incidenza di ogni subsistema tecnologico sull'impatto complessivo del prototipo. Dalla lettura del grafico (Fig. 3), espresso in termini percentuali, emerge come nello Scenario di Progetto il subsistema della chiusura verticale opaca impatti in maniera considerevole sul totale, in particolare per il 38% dell'*Embodied Carbon* e il 44% dell'*Embodied Energy* del prototipo. Dall'analisi LCA è possibile notare che l'elevata incidenza, in termini percentuali sul totale, della chiusura verticale opaca è dovuta dal fatto che la struttura portante (il subsistema che generalmente incide per più del 50% in un edificio *Business as Usual*) ha un basso impatto ambientale grazie alla scelta progettuale di riutilizzare container (a impatto nullo) e di utilizzare acciaio 100% riciclato per gli elementi integrativi. Ciò porta ad un'incidenza della struttura portante pari al 7% sull'impatto totale del prototipo sia per l'*Embodied Energy* sia per l'*Embodied Carbon*. Il valore del 7% è da attribuirsi ai componenti integrativi, come i pali di fondazione, gli elementi di connessione tra i container riusati e la struttura portante a telaio in acciaio riciclato della parte SA0-SA1 di nuova costruzione. In particolare, le fondazioni incidono circa per il 3% sull'*Embodied Carbon* totale del prototipo e per il 2% sull'*Embodied Energy* totale del prototipo; la struttura di elevazione SA0 e SA1 incide per il 2% dell'impatto totale del prototipo, in entrambi gli im-

patti. Va inoltre sottolineato che gli impatti della struttura portante del prototipo analizzato sono bassi perché non è presente alcun vano interrato.

Riguardo il subsistema "impianto di fornitura servizi", che comporta il 13% dell'*Embodied Carbon* e l'11% dell'*Embodied Energy* totale del prototipo, la quota parte maggiore è rappresentata dai pannelli fotovoltaici che da soli costituiscono il 91% dell'*Embodied Carbon* e l'86% dell'*Embodied Energy* del subsistema "impianto di fornitura servizi". Soffermandosi sui sottosistemi più incidenti dello scenario di progetto, dall'analisi emerge che gli impatti totali della sola chiusura verticale opaca risultano $2,65\text{E}+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ per l'*Embodied Carbon* e $6,42\text{E}+05 \text{ MJ}$ per l'*Embodied Energy* (si rimanda al paragrafo 3.5 il paragone della scelta di progetto con una soluzione tradizionale); mentre gli impatti della chiusura verticale trasparente ammontano a $1,77\text{E}+04$ di *Embodied Carbon* e $3,04\text{E}+05$ di *Embodied Energy*. È utile quindi approfondire quali siano i materiali utilizzati che influiscono sul risultato. La maggiore incidenza in termini quantitativi nella chiusura verticale opaca è particolarmente rappresentata dagli isolanti (circa 8,5 ton), costituiti maggiormente dal vetro cellulare ad elevata densità, e dai materiali compositi (circa 4,8 ton) nei quali incidono i rivestimenti di facciata in fibrocemento e laminato. In minore quantità vi è l'alluminio (circa 0,3 ton) che costituisce la sottostruttura dei pannelli di rivestimento di facciata e l'acciaio (circa 1,1 ton) utilizzato come mensole di supporto. Nella chiusura verticale trasparente si nota l'incidenza quantitativa dell'alluminio (1,3 ton) che costituisce il telaio delle finestre e parte dei sistemi oscuranti, e il vetro delle finestre (circa 1,83 ton). Dallo studio LCA emerge che gran parte dell'impatto *Embodied Carbon* è dato dall'isolante della chiusura verticale opaca e dall'alluminio della chiusura verticale trasparente. Gli stessi materiali incidono maggiormente anche sull'*Embodied Energy*.

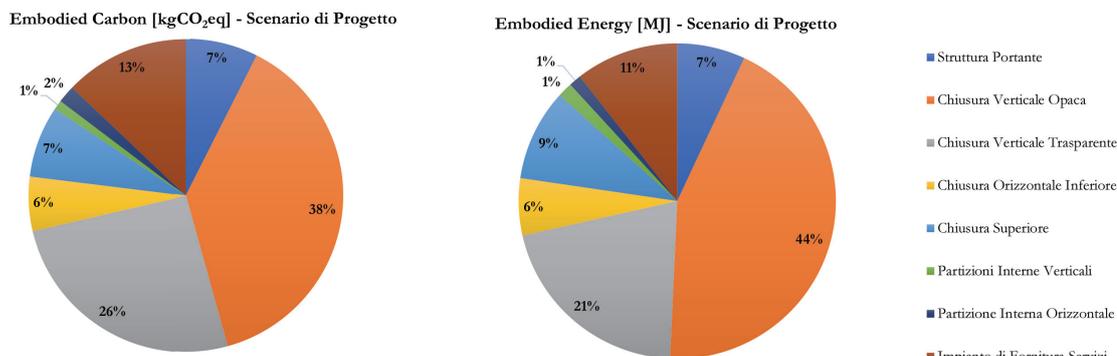


Figura 3 – Incidenza di ogni subsistema sull'*Embodied Carbon* e sull'*Embodied Energy* del prototipo

In secondo luogo, particolarmente incidenti sia per *Embodied Carbon* sia per *Embodied Energy* sono i pannelli di rivestimento della facciata e la relativa sottostruttura in alluminio. La scelta di tali materiali è stata però dettata dalla volontà di garantire una ridotta manutenzione dell'edificio nel tempo e dunque di adottare materiali particolarmente durevoli che evitino processi di sostituzione, annullando gli impatti della fase d'uso B4 (*replacement*).

3.2. Impatti LCA della fase di trasporto dallo stabilimento produttivo al cantiere (A4)

La fase di trasporto (A4) è stata calcolata considerando la massima ottimizzazione dei trasporti per materiali provenienti dallo stesso stabilimento produttivo, attraverso tipologia di trasporto su gomma. Rispetto all'impatto totale del prototipo (*Embodied Carbon* pari a $6,91+04$ kg/CO₂eq ed *Embodied Energy* pari a $1,47E+06$ MJ), il trasporto non è molto incidente: $5,29E+03$ kgCO₂eq e $8,78E+04$ MJ rispettivamente determinando un aumento degli impatti del 7% su *Embodied Carbon* e del 6% su *Embodied Energy*.

I grafici (Fig. 4 e Fig. 5) mettono in risalto come l'impatto di trasporto degli isolanti sia elevato rispetto agli altri materiali. Per questa ragione, vengono di seguito analizzati i valori che possano esplicitare quali siano i motivi che causano un aumento così importante degli impatti di trasporto degli isolanti. La valutazione LCA mostra che l'elevato impatto è provocato dal trasporto del vetro cellulare, che è anche l'isolante quantitativamente più utilizzato, per un totale di 13,34 ton (si pensi che l'intera struttura portante di acciaio pesa 27 ton) ed è il materiale con maggiore distanza di approvvigionamento, pari a 864 km (la distanza massima di reperimento dei container della struttura portante è invece pari a 155 km).

Ancora una volta, occorre sottolineare che la scelta dell'isolante in vetro cellulare è stata adottata principalmente in relazione alla durabilità del materiale stesso e alla impermeabilità che porta ad escludere l'utilizzo di eventuali guaine di protezione aggiuntive; al momento vi è un unico stabilimento produttivo di tale materiale in Europa, collocato in Belgio. In fase di sviluppo del prototipo, inoltre, è stata considerata la prospettiva avanzata dal produttore di apertura di un nuovo stabilimento di produzione di vetro cellulare in Emilia-Romagna, che porterebbe a non influire in maniera così evidente sull'impatto di trasporto. Simulando quindi l'opzione migliorativa di approvvigionamento del vetro cellulare dal nuovo stabilimento, gli impatti totali di

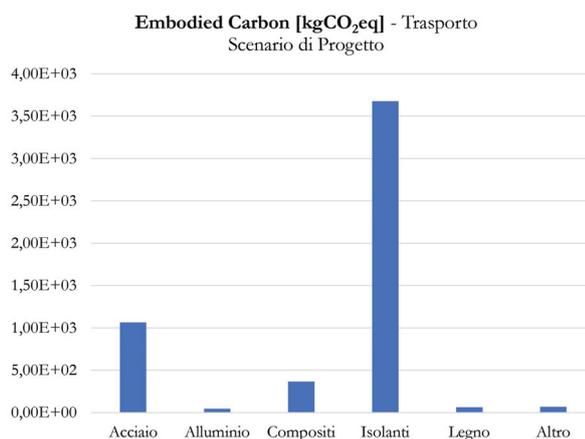


Figura 4 – Embodied Carbon per il trasporto dei materiali di progetto

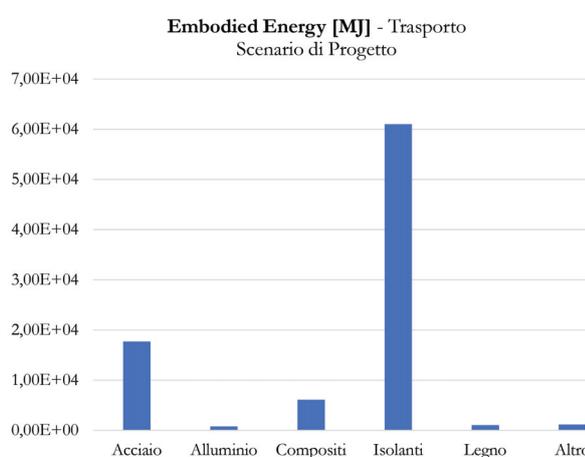


Figura 5 – Embodied Energy per il trasporto dei materiali di progetto

trasporto si abbasserebbero a più della metà: $2,40E+03$ kgCO₂eq e $3,98E+04$ MJ, riducendo quindi l'incidenza sugli impatti del prototipo.

3.3. Confronto tra impatti LCA di Produzione, Trasporto e Fase d'uso

Per quanto riguarda la fase d'uso, il prototipo è dotato di un sistema *off-grid* che copre il totale fabbisogno energetico mediante la produzione di energia con pannelli fotovoltaici. Il prototipo risulta quindi indipendente dalla rete di fornitura nazionale. Detto sistema copre un fabbisogno energetico pari a circa 73 kWh/m²a per il riscaldamento, circa 50 kWh/m²a per il raffrescamento e circa 15 kWh/m²a per acqua calda sanitaria, per un totale di 138 kWh/m²a.

Risulta interessante confrontare l'energia consumata durante le fasi di produzione e trasporto, con il fabbisogno durante la fase d'uso: si precisa che non ci si riferisce agli impatti dei consumi della fase d'uso, in quanto, si considera il solo fabbisogno energetico, che viene coperto dalla produzione di

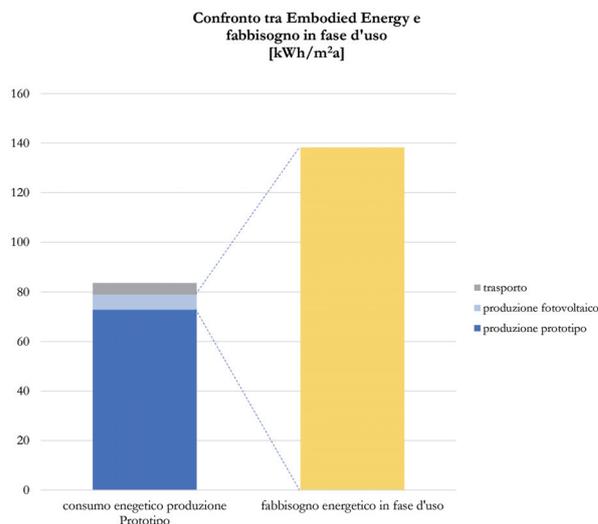


Figura 6 – Confronti tra consumo energetico in fase di produzione e trasporto (Embodied Energy) e fabbisogno energetico in fase d'uso soddisfatto dalla produzione di energia elettrica dei pannelli fotovoltaici (impatto zero in fase d'uso)

energia rinnovabile tramite i pannelli fotovoltaici per cui non determina degli impatti e dei consumi durante la fase d'uso (B6).

Per poter compiere la comparazione con i dati disponibili riguardanti la fase d'uso, il valore complessivo di *Embodied Energy* del prototipo è stato diviso per i metri quadrati di superficie utile interna e per gli anni di vita utile, assunti pari a 50 anni, al fine di esprimere il risultato di impatto in MJ/m²a, poi trasformato in kWh/m²a. Tale valore è stato utile al fine di paragonare l'energia incorporata del prototipo con l'energia richiesta in fase d'uso.

Dal confronto tra l'*Embodied Energy* del prototipo e il fabbisogno di energia in fase d'uso, come si evin-

ce da Figura 6, si riscontra che il consumo della fase di produzione e trasporto risulta inferiore (circa poco più della metà) al fabbisogno in fase d'uso, che viene soddisfatto dalla produzione di energia elettrica dei pannelli fotovoltaici. L'impatto provocato dalla produzione dei pannelli fotovoltaici va quindi a coprire un fabbisogno energetico che sarà soddisfatto ad impatto zero in fase d'uso; sicuramente la scelta di autoproduzione di energia rinnovabile è vantaggiosa rispetto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici tramite fornitura da rete elettrica nazionale, che, considerando il mix medio nazionale attuale, avrebbe sicuramente impatti superiori.

Il ridotto impatto ambientale della fase di produzione è stato assicurato dall'uso di container da riuso che ha drasticamente ridotto l'impatto relativo alla struttura portante dell'edificio, che in genere incide per il 50% sull'impatto complessivo di edificio.

3.4. Confronto LCA tra scenari alternativi di uso dell'acciaio nel Progetto: acciaio vergine versus acciaio riciclato e container di nuova produzione versus riuso dei container

Al fine di evidenziare i benefici ambientali che le scelte progettuali quali il riuso di container e l'uso di acciaio 100% riciclato determinano, attraverso l'analisi LCA viene comparato lo Scenario di Progetto con altri cinque ipotetici scenari di progettazione (cfr. paragrafo 1.3).

Dalle analisi effettuate emerge che in termini ambientali il vantaggio maggiore è determinato dal riuso di container, mentre l'utilizzo di acciaio riciclato nelle altre parti strutturali risulta meno influente. Per questa ragione, nei grafici (Fig. 7 e 8), si è deciso di riassumere i risultati finali raggrup-

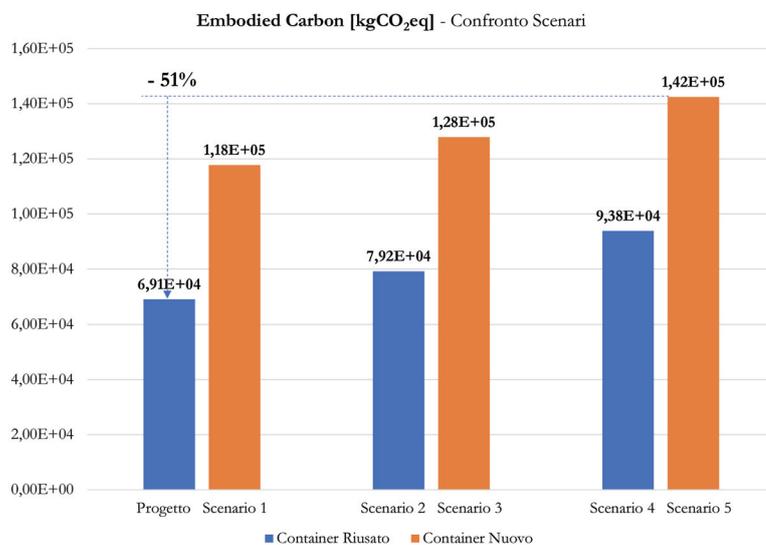


Figura 7 – Embodied Carbon – Confronto tra i diversi Scenari

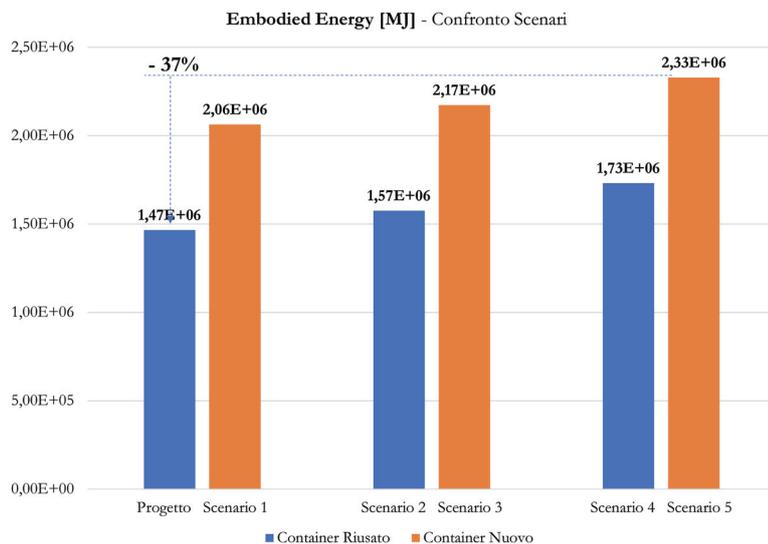


Figura 8 – Embodied Energy – Confronto tra i diversi Scenari

pati in base alle percentuali di riciclaggio dell'acciaio, così da rendere ancora più evidente la riduzione degli impatti grazie all'impiego di container riusati piuttosto che nuovi. È possibile notare che con le scelte di progetto (container riusati e acciaio riciclato al 100%) si riesce ad evitare più della metà (-51%) delle emissioni di CO₂ rispetto allo Scenario 5, e più di un terzo (-37%) dell'energia incorporata. Si tratta di una notevole riduzione degli impatti ambientali, che rende l'opzione del riuso particolarmente vantaggiosa e da perseguire.

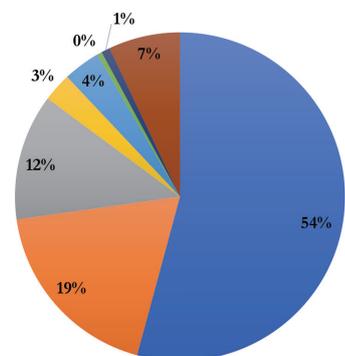
Analizzando in particolare lo Scenario 5 (*Baseline*) è possibile evidenziare che la struttura portante (in acciaio vergine e utilizzo di container nuovi) incide del 54% sull'*Embodied Carbon* e del 41% sull'*Embodied Energy*, a confronto dello Scenario di Progetto del prototipo CHOMgenius, nel quale ha un'incidenza solo del 7% per entrambi gli impatti (Fig. 9). La variazione dei diversi scenari influenza in particolare gli impatti del subsistema della struttura

portante, in cui viene conteggiato interamente l'uso dei container. Va però sottolineato che i container costituiscono anche parte delle chiusure verticali di involucro e delle partizioni interne, come avviene per i sistemi strutturali portanti continui, evitando l'uso di *layer* aggiuntivi per la realizzazione dello strato resistente delle pareti, e questo, quindi, contribuisce indirettamente alla riduzione degli impatti anche degli altri subsistemi.

3.5. Confronto LCA tra soluzioni costruttive di Progetto e soluzioni costruttive Business as Usual

Un ulteriore ambito di approfondimento dello studio LCA riguarda il paragone tra le soluzioni costruttive del prototipo di progetto e soluzioni *Business as Usual*, ovvero realizzate con tecnologie costruttive convenzionalmente utilizzate nella pratica corrente, a parità di prestazione termica. Lo studio si concentra sulle scelte costruttive dell'involucro, ovvero della chiusura verticale opaca, della

Embodied Carbon [kgCO₂e] - Scenario 5



Embodied Energy [MJ] - Scenario 5

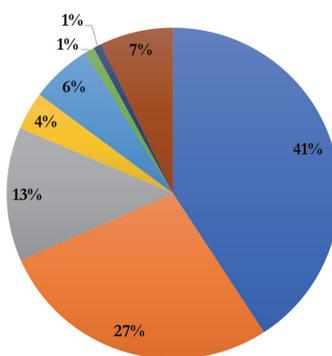


Figura 9 – Incidenza di ogni subsistema sull'Embodied Carbon e sull'Embodied Energy del prototipo – Scenario 5 – Acciaio vergine e Containers nuovi

chiusura orizzontale superiore e della chiusura orizzontale inferiore.

3.5.1. Chiusura verticale opaca

Come già dichiarato nel paragrafo 2.1, gli impatti totali della chiusura verticale opaca risultano $2,65E+04$ kgCO_2eq per l'*Embodied Carbon* e $6,42E+05$ MJ per l'*Embodied Energy*. Tale subsistema di progetto è costituito dallo strato resistente verticale del container, isolamento in vetro cellulare e il sistema di rivestimento misto in parte in laminato, in parte in fibrocemento e in parte in alluminio con sottostruttura in alluminio, optando quindi per una soluzione completamente a secco e reversibile. In alternativa si ipotizza una soluzione convenzionale, a parità di trasmittanza termica, composta da blocchi forati in laterizio doppio UNI, isolamento in EPS da 20 cm, finitura interna in intonaco e finitura esterna in pannelli di rivestimento in fibrocemento agganciati tramite sottostruttura in alluminio. Come si evince dalle figure 10 e 11, la soluzione di progetto evita il 35% delle emissioni di CO_2 , e il 1,3% del consumo di energia, rispetto alla soluzione convenzionale.

Nei risultati della comparazione influiscono molto nella soluzione di progetto, ovvero del prototipo CHOMgenius, il vetro cellulare e la parte di rivestimento in alluminio, e nella soluzione BAU il blocco in laterizio accoppiato allo strato di EPS, insieme, in entrambi i casi, alla sottostruttura in alluminio della facciata ventilata. Per quanto riguarda l'*Embodied Carbon*, la grande quantità di laterizio fa aumentare la CO_2 incorporata rispetto della soluzione di progetto. Mentre riguardo l'*Embodied*

Energy, il vetro cellulare, anche se quantitativamente inferiore, e il sistema di rivestimento misto va quasi a equiparare la soluzione *Business as Usual*, in quanto i materiali stessi hanno un valore di energia incorporata molto alto. La scelta dell'isolante in vetro cellulare è però stata determinata dalla notevole durabilità e dunque dal fatto che si tratta di un isolante che non richiede cicli di sostituzione durante la vita utile dell'edificio. Per il medesimo motivo, nel progetto, è stata scelta la sottostruttura del rivestimento di facciata in alluminio che, in confronto ad altre sottostrutture (es. in legno), risulta avere una lunga durata e una ridotta manutenzione. Occorre sottolineare inoltre che la soluzione di progetto è avvantaggiata dal fatto che lo strato resistente della chiusura verticale opaca è costituito dalla parete laterale del container riusato, quindi ad impatto zero.

3.5.2. Chiusura orizzontale superiore

Il confronto tra progetto e BAU prende in considerazione l'intero pacchetto di chiusura orizzontale superiore, ovvero la struttura portante di solaio e le parti di completamento, fino allo strato di impermeabilizzazione. Nella soluzione di progetto la chiusura considera la struttura di solaio, costituita dalla parte superiore del container, lo strato di isolamento e lo strato impermeabilizzante, anche questa volta posato a secco. La soluzione BAU ipotizzata è composta da una struttura di solaio in latero cemento (16+4) e cordolo in c.a., uno strato di isolamento di 20 cm di XPS, massetto di pendenza e finitura interna in intonaco. Le figure 12 e 13 mostrano che il progetto garantisce un impatto evitato pari a -87% di *Embodied*

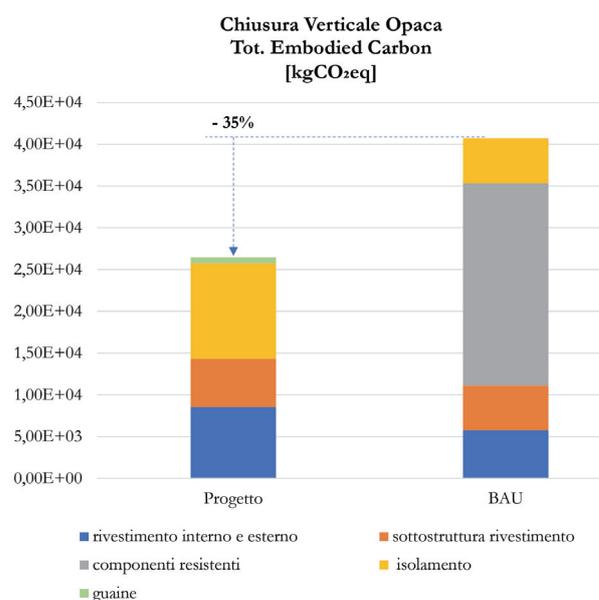


Figura 10 – Embodied Carbon progetto/BAU per chiusura opaca verticale

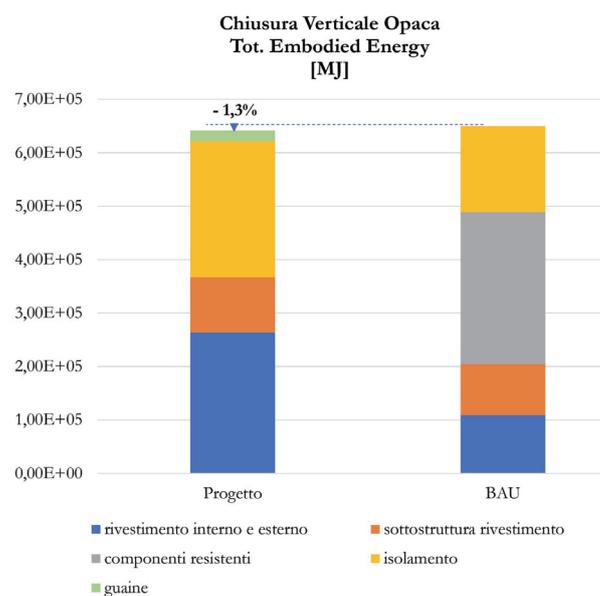


Figura 11 – Embodied Energy progetto/BAU per chiusura opaca verticale

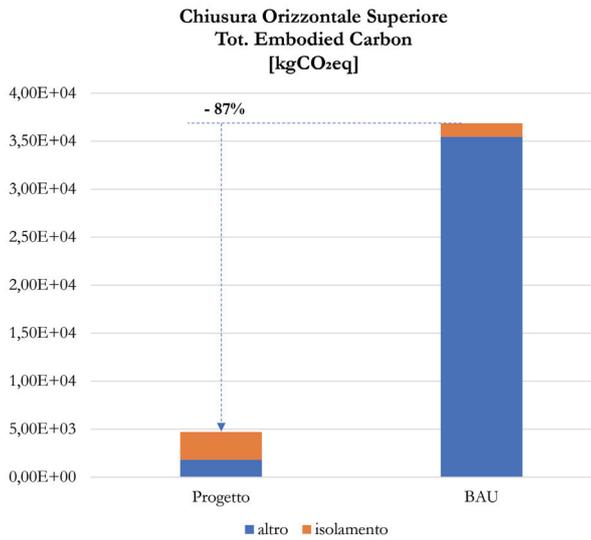


Figura 12 – Embodied Carbon progetto/BAU per copertura

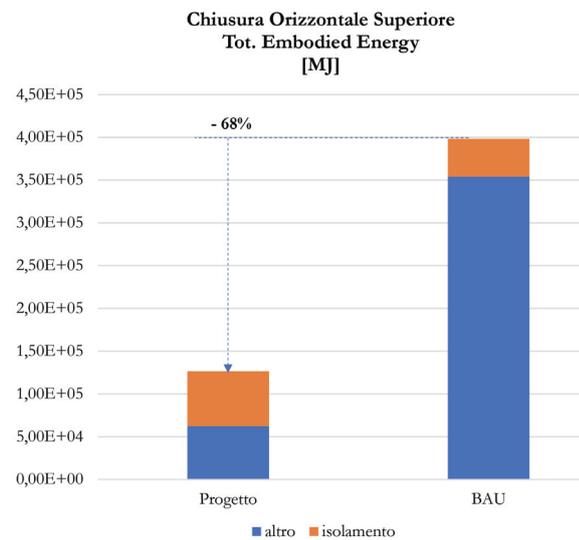


Figura 13 – Embodied Energy progetto/BAU per copertura

Carbon e a -68% di Embodied Energy. In questa comparazione, l'incidenza dello strato isolante di progetto risulta più impattante in una soluzione convenzionale, ma il grande vantaggio ambientale che il progetto ha rispetto ad una soluzione *Business as Usual* è dato dalla mancanza di impatto della struttura portante di copertura, soddisfatta, anche questa volta, dal modulo container riusato.

3.5.3. Chiusura orizzontale inferiore

Nella comparazione della soluzione di chiusura orizzontale inferiore sono state considerate le fondazioni e il solaio contro terra. Il progetto utilizza una tecnica di fondazione a secco e disassemblabile, costituita da pali in acciaio connessi attraverso piatti in acciaio alla struttura del container. Inol-

tre, utilizza il vetro cellulare come layer tra la terra e la struttura di container, in quanto lo stesso garantisce isolamento termico, impermeabilizzazione all'acqua e barriera anti radon, andando quindi ad evitare la posa di ulteriori strati.

La soluzione BAU, invece, ipotizza una soluzione convenzionale, con fondazioni a travi rovesce in calcestruzzo armato, magrone, guaina impermeabilizzante, cassero a perdere per vespaio aerato, isolamento XPS da 20 cm, e massetto strutturale in calcestruzzo armato.

Dalle figure 14 e 15 si evince che la soluzione di progetto, nella quale vengono coinvolti minori quantità di materiale e nella quale la struttura resistente di solaio è costituita dal container riusato e dunque a impatto nullo, risulta più vantaggiosa ri-

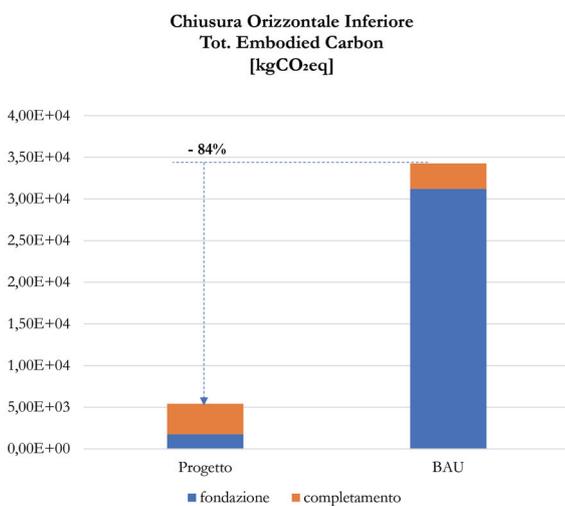


Figura 14 – Embodied Carbon progetto/BAU per chiusura inferiore

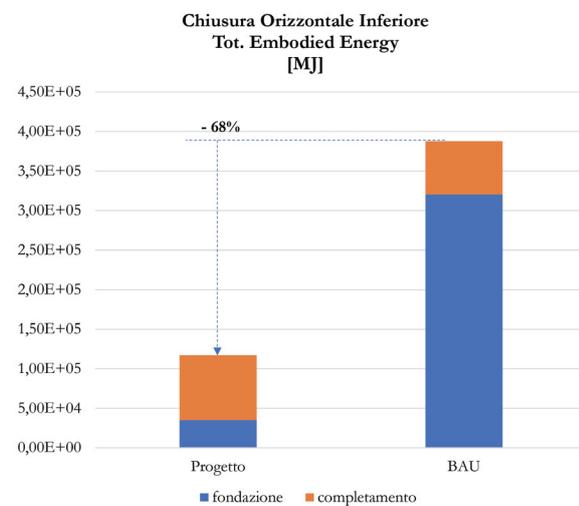


Figura 15 – Embodied Energy progetto/BAU per chiusura inferiore

spetto ad una soluzione BAU. In particolare, la chiusura orizzontale inferiore di progetto evita l'84% di CO₂ incorporata e il 68% di energia incorporata, rispetto ad una soluzione BAU.

4. CONCLUSIONI

Il presente contributo ha mostrato, attraverso la valutazione LCA, la quantificazione degli impatti e dei benefici ambientali derivati da strategie di circolarità, come il riuso di elementi costruttivi e l'utilizzo di materiali a elevato contenuto di riciclato in edilizia. In particolare, questo studio LCA ha sottolineato i benefici del riuso di container come elemento strutturale in edilizia (vero e proprio esempio di *upcycling*). Il riuso di container, infatti, evita il consumo di ulteriori materie prime per la costruzione della struttura portante di edificio, e non necessitando di modifiche dimensionali, non comporta impatti di trasformazione. Costituendo quindi, in accordo con l'approccio della metodologia LCA, una struttura portante ad impatto zero in fase di produzione, i container riusati riducono drasticamente l'impatto ambientale complessivo dell'edificio.

Inoltre, il riutilizzo di container porta vantaggi ambientali non solo al subsistema della struttura portante ma anche ad altri sottosistemi di edificio, in quanto il container stesso costituisce anche parte delle pareti verticali di involucro orizzontale inferiore, superiore, verticale e di partizione interna, sostituendo parti resistenti tradizionali.

Inoltre, lo studio LCA compiuto, ha analizzato le scelte costruttive reversibili e a secco messe in atto nel prototipo oggetto di valutazione, comparate rispetto a soluzioni convenzionali. Lo studio LCA ha dimostrato che le scelte di soluzioni innovative smontabili e riutilizzabili abbinate al riuso di container hanno un impatto ambientale inferiore rispetto a soluzioni convenzionali. Inoltre, la possibilità di disassemblaggio permette scenari di fine vita di riuso e riciclo dei componenti che non comportano impatti ambientali legati al conferimento in discarica.

Tuttavia, è da considerare che la valutazione del ciclo di vita condotta nell'ambito di questo studio ha diversi limiti e suggerisce occasioni per la ricerca futura. Ulteriori scenari potrebbero essere successivamente valutati, attraverso analisi di sensibilità e analisi probabilistiche dell'incertezza. È inoltre importante estendere la valutazione a tutti gli altri indicatori di impatto ambientale, al fine di verificare che non accada uno spostamento di carico ambientale tra i diversi impatti ambientali.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Buyle M., Galle W., Debacker W. e Audenaert A. (2019) Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. *Journal of Cleaner Production*, vol (218): 141-156.
- Commissione europea (2020) COM 98, Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare Per un'Europa più pulita e più competitiva, Bruxelles.
- Dara C., Hachem-Vermette C. e Assefa G. (2019) Life Cycle Assessment and life cycle costing of container based single-family housing in Canada: A case study. *Building and Environment*, vol. (163): 106332.
- Eurostat, 2016. Key figures on Europe, Belgium, pp. 161-164.
- Giorgi S., Lavagna M. e Campioli A. (2017) Procedure di allocazione nella metodologia LCA e tendenze settoriali verso un'economia circolare. Conference proceeding Rete Italiana LCA conference "Resource efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking".
- Islam H., Zhang G., Setunge S. e Bhuiyan M.A. (2016) Life Cycle Assessment of shipping container home: A sustainable construction. *Energy and Buildings*, vol. (128): pp. 673-685.
- Jaillon L. e Poon C.S. (2014) Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, vol. (39): 195-202.
- Satola D., Kristiansen A.B., Houlihan-Wiberg A., Gustavsen A., Ma T. e Wang R.Z. (2020) Comparative Life Cycle Assessment of various energy efficiency designs of a container-based housing unit in China: A case study. *Building and Environment*, vol (186): 107358.
- Tavares V., Lacerda N. e Freire F. (2019) Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The "Moby" case study. *Journal of Cleaner Production*, vol. (212):1044-1053.

NOTA

Questo contributo fa parte della ricerca "cHOMgenius project. PrototypeSystem&SharedProject. Extraordinary solutions for smart living", partnership BFC Sistemi. Whiteam. Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e Ingegneria delle costruzioni, Politecnico di Milano. Coordinatore scientifico Prof.ssa Elisabetta Ginelli, cofinanziato dal fondo Smart Living della Regione Lombardia. Gruppo di lavoro: Claudio Chesi, Laura Daglio, Giuliano Dall'O', Emilio Faroldi, Monica Lavagna, Giuditta Lazzati, Davide Pirillo, Gianluca Pozzi, Leopoldo Sdino, Andrea Tartaglia, Marco Lorenzo Agostino Trani, Gianni Utica, Giulia Vignati. Il prototipo è stato realizzato grazie a: Abet Laminati Spa, Alpac Srl, Boldarino Spa, Comoli Ferrari & c. Spa, Daku Italia Srl, Eterno Ivica Srl, Foamglas Italia Srl, Fontanot Scale Spa, G.S.E. - Krinner Italia, Index Spa, Livith Spa, Metra Spa, Pantecnica Spa, Restende Srl, Sandrini Metalli, Sanika GmbH, Si.Cop Etanco Italia Srl, Sil Società Italiana Lastre Spa, Tabu Spa, Tecnoelettrica Bragoni Srl, UNI (Ente Nazionale Normazione). Il lavoro descritto nell'articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking" tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca "AWARE" (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA.