



UNIVERSITÀ DI PISA

Il **principio** di **neutralità**
dei materiali da costruzione
per la **sostenibilità** dell'**edificio**
nel ciclo di vita

a cura di:

Caterina Gargari,
Architetto, PhD, membro CEN TC350 Sustainability
of construction work

Fabio Fantozzi,
Professore Associato Dip. DESTEC,
Università degli Studi di Pisa

Indice

Abstract	3
Riflessioni sulla promozione dei materiali in un'ottica di sostenibilità	7
La rilevanza di un approccio LCA dalla culla alla tomba	9
Durabile significa sostenibile	11
Gli impatti ambientali dell'edificio nel ciclo di vita	15
L'importanza del fine vita dell'edificio	23
L'incertezza nella valutazione del contributo ambientale legato al processo di sequestro di carbonio	27
La gestione sostenibile delle foreste	33
Gli indicatori di impatto descrittivi della sostenibilità nelle costruzioni	35
Conclusioni	41
Bibliografia	43



Bosco Verticale, Milano, Boeri Architetti + Barreca + Lavarra



Abstract

Dossier a cura di:
Caterina Gargari,
Architetto, PhD, membro CEN TC350 Sustainability of construction work
Fabio Fantozzi,
Professore Associato Dip. DESTEC, Università degli Studi di Pisa

La comunità scientifica internazionale è concorde nell'affermare che una accurata valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici non possa prescindere da alcuni requisiti fondamentali:

- l'approccio Life Cycle
- l'utilizzo di una metodologia LCA univoca
- la valutazione degli impatti ambientali nel ciclo di vita del prodotto edilizio e almeno durante le fasi di produzione, uso e fine vita, nonché dei benefici attesi dalle attività potenziali di riuso e riciclo al termine della vita utile
- il confronto a parità di equivalente funzionale
- l'utilizzo di dati di inventario omogenei
- una valutazione condotta tenendo conto di tutti gli indicatori obbligatori.

Tali requisiti precludono ogni possibilità di generalizzazione che veda un elemento, un componente o addirittura un materiale, preferito rispetto ad un altro, al di fuori di uno scenario di analisi puntuale e contestualizzato.

In questa logica, e sulla base della più recente bibliografia scientifica, il presente documento offre una lettura critica dei risultati raccolti e delle incertezze, emerse dagli studi condotti sulla sostenibilità ambientale dei prodotti di origine rinnovabile impiegati in edilizia evidenziando come:

1. i risultati degli studi finora svolti non sono tra loro confrontabili poiché spesso non elaborati a parità di metodo
2. le conclusioni derivanti da studi che analizzino la sola fase di estrazione/produzione del prodotto non sono attendibili
3. la gestione del suolo nella fase di produzione della materia prima rinnovabile influenza in maniera determinante gli impatti ambientali del prodotto e tali impatti devono essere considerati nella analisi, obbligando all'utilizzo di dati di inventario LCI geo-referenziati
4. il trasporto dal luogo di estrazione al cantiere è un dato rilevante nella caratterizzazione degli impatti, ancor più in uno scenario nazionale di importazione, come quello italiano
5. gli impatti relativi alla fase di fine-vita del prodotto sono fortemente condizionati dalla definizione dello scenario di fine vita e possono invertire il valore calcolato nella fase di produzione
6. la durabilità è un elemento discriminante nella determinazione degli impatti ambientali nel ciclo di vita
7. diversi metodi impiegati per il calcolo del bilancio del ciclo di carbonio nei prodotti di origine rinnovabile conducono a risultati contrastanti ed è necessario quindi identificare una metodologia univoca di calcolo.

Tutto ciò premesso, si ritiene inopportuno orientare genericamente verso l'utilizzo di materiali specifici, senza che i benefici di tale utilizzo, siano puntualmente verificati attraverso una valutazione condotta con metodologie armonizzate, per scenari tecnologici ed economici concreti.

The international scientific community agrees that an accurate assessment of the environmental sustainability of buildings cannot disregard some basic requirements:

- *a Life Cycle approach*
- *an harmonized LCA methodology*
- *a full life cycle assessment of building and building products or, at least, the assessments of impacts during production, use and end of life phases, as well as the expected benefits from the potential reuse and recycling activities at the end of the reference service life*
- *a comparison based on the same functional equivalent*
- *the use of homogeneous datasets*
- *an assessment that includes all mandatory indicators.*

These requirements preclude any possible generalization, that defines an element, a component or even a material, preferred over another, outside of a specific and contextualized scenario of analysis.

Therefore, and on the basis of the most recent scientific bibliography, this document offers a critical review of the results and of the uncertainties, which emerged from the more recent research studies on sustainability of renewable materials used in building construction, highlighting how:

- results of the studies carried out so far are not comparable with each other as they are often based on different LCA methodologies*
- conclusions deriving from studies that analyze extraction/production LCA phase only are not reliable*
- the management of the forest/soil has a decisive influence on the environmental impacts of the renewable product and these impacts must be considered in the analysis, requiring the use of geo-referenced LCI inventory data*
- the transport from the extraction site to the construction site is a relevant input to determine LCA impacts, much more when an import scenario is modelled, such as the Italian one*
- impacts relating to the end-of-life phase of the product are strongly conditioned by the definition of the end-of-life scenario and can invert the impact value assessed during the production phase*
- durability is a discriminating element in determining the environmental impacts over the life cycle of a building product*
- different methods used to calculate the biogenic carbon balance in renewable products lead to conflicting results and an harmonized calculation methodology is then needed.*

Now therefore, the indiscriminate promotion of specific materials seems to be inappropriate, when benefits of such use haven't been verified through an LCA assessment based on harmonized methodologies and real technological and economic scenarios.

Acronimi

EPD *Environmental Product Declaration*

PCR *Product Category Rule*

RSL *Reference Service Life*

EOL *End of Life*

GWP *Global Warming Potential*

LCA *Life Cycle Assessment*

LCI *Life Cycle Inventory*

LCIA *Life Cycle Impact Assessment*



Padiglione Chateau Margaux Bordeaux, Foster+Partners @NigelYoung (pubblicato su CIL168)

Riflessioni sulla promozione dei materiali in una ottica di sostenibilità

La Proposta di Piano per la Transizione Ecologica – Inquadramento Generale elaborato dal CITE, e nello specifico le indicazioni di cui al paragrafo c) “Approccio dei criteri ambientali minimi per il conseguimento degli obiettivi ambientali” della bozza di revisione dei CRITERI AMBIENTALI MINIMI PER L’AFFIDAMENTO DEL SERVIZIO DI PROGETTAZIONE E LAVORI PER INTERVENTI EDILIZI, introducono alcuni aspetti di certa rilevanza nell’ottica di decarbonizzazione ed economia circolare portata avanti dalla politica EU, ma nell’ambito del contributo offerto dal settore dell’edilizia ai piani europei di sviluppo sostenibile, sussistono dubbi rilevanti sulla opportunità ed efficacia di un tale messaggio, che invita alla sostituzione dei materiali convenzionali con materiali *bio-based*.

Non solo perché la filiera italiana del legno, del sughero, della canapa (solo per citare alcuni esempi dei materiali *bio-based* più comunemente impiegati in edilizia) ad oggi, non è in grado di sopperire alle richieste attuali del mercato e una quota consistente della materia prima viene di fatto importata, con aggravio consistente delle emissioni di CO₂ in ambiente legate alle operazioni di trasporto, ma perché, tale proposta agisce su un patrimonio edilizio e culturale definito e caratterizzato dall’uso di questi materiali, da secoli impiegati non per assenza di alternative (l’uso del legno in edilizia, anche in Italia, è noto), ma perché di fatto dimostratisi più efficienti ed efficaci in termini di costi-benefici, di altri materiali disponibili.

Tale affermazione, che di fatto penalizza e discrimina in maniera significativa diversi comparti produttivi a vantaggio di un singolo, all’interno di documenti strategici di orientamento della politica ministeriale per la transizione ecologica, suggerisce una serie di riflessioni:

1. È responsabilità del legislatore creare condizioni di parità per tutti i comparti produttivi e agire nell’interesse generale di un miglioramento complessivo delle prestazioni di materiali ed edifici per raggiungere gli obiettivi specifici di efficienza energetica e riduzione delle emissioni di CO₂ nel ciclo di vita che l’Europa ha stabilito con la direttiva (UE) 2018/844 e più recentemente richiamato nella [1] Comunicazione della Commissione al Parlamento

Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni *“Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: investire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita”*

2. Come citato in [1] per realizzare ristrutturazioni della profondità e dell'entità di cui l'Europa ha bisogno, è necessario un settore edile forte e competitivo, che abbracci l'innovazione e la sostenibilità per crescere in qualità e ridurre i costi. In linea con il principio della imparzialità materica, è compito del legislatore prescrivere obiettivi e traguardi per il settore edilizio (materiali, edifici, infrastrutture) sotto il profilo del risparmio energetico e delle risorse, senza però esprimere preferenze per un materiale od una tecnologia specifica. Tale preferenza, lontana dall'assicurare, a priori, un miglioramento delle prestazioni dell'edificio, contrasta con i principi di equità di mercato, introducendo elementi di discriminazione e di distorsione del mercato, limitando la competitività e l'innovazione del settore delle costruzioni.
3. Il comparto dei prodotti da costruzione, oggi in Italia rappresenta, in volume di affari, un valore di produzione pari a 74 Mld EUR di cui solo il 2,18% è il peso percentuale, in valore, delle costruzioni realizzate in legno (calcolato sugli investimenti totali in nuove costruzioni). Ogni misura politica che condizioni la stabilità e la crescita potenziale di questa filiera produrrà necessariamente impatti sull'occupazione, sull'economia e sul benessere sociale che sono da valutare anche nel rispetto dei principi di accessibilità economica introdotti dalla politica EU¹.
4. Dal punto di vista tecnico, è possibile massimizzare la riduzione dell'impronta ambientale degli edifici solo impiegando le risorse in modo efficiente e circolare durante l'intero ciclo di vita dell'edificio. Le opere edili sono sistemi complessi in cui i processi di fabbricazione dei prodotti da costruzione costituiscono solo una parte del ciclo di vita dell'edificio. Gli obiettivi di progettazione, uso e demolizione sostenibile degli edifici possono essere perseguiti solo quando si tiene conto dell'influenza di tutti i componenti, della loro installazione, delle prestazioni in uso e del trattamento a fine vita in relazione allo specifico contesto tecnologico ed economico di riferimento e non è scientificamente sostenibile una asserzione di priorità di un materiale rispetto ad un altro, al di fuori del contesto dell'edificio.

Il principio di rispetto dell'estetica e della qualità architettonica introdotto dal documento *Verso una Baukultur di alta qualità per l'Europa* [2] prevede che ogni intervento di costruzione/ristrutturazione debba rispettare i principi di *“conservazione della progettazione, della fattura, del*

¹ [1] “accessibilità economica” - assicurare un'ampia disponibilità di edifici efficienti sotto il profilo energetico e sostenibili, segnatamente per le famiglie a basso e medio reddito e per le persone e le zone vulnerabili

patrimonio e dello spazio pubblico. Il design dell'ambiente costruito, le relazioni tra gli oggetti e il loro ambiente costruito e naturale, la coerenza spaziale, la scala, la materialità: questi sono tutti fattori che hanno un impatto diretto sulla nostra qualità della vita. Una Baukultur di alta qualità si esprime quindi nell'applicazione di un design consapevole e ben discusso a ogni attività edilizia e paesaggistica, dando priorità ai valori culturali rispetto al guadagno economico a breve termine. Baukultur di alta qualità non soddisfa solo i requisiti funzionali, tecnici ed economici, ma soddisfa anche i bisogni sociali e psicologici delle persone". Tale indicazione pone in rilievo l'importanza del linguaggio costruito dell'architettura esistente e l'importanza che i materiali della tradizione costruttiva rivestono nella creazione e nella tutela della Baukultur.

Tralasciando gli aspetti di rilevanza economica e sociale legati alla scelta politica di privilegiare un materiale da costruzione, fin qui solo brevemente accennati e sui quali si invita comunque il legislatore ad un confronto per una più accurata valutazione e discussione da condurre in altre sedi, è premura, in questo documento, valutare gli aspetti propriamente tecnico-scientifici che una tale affermazione coinvolge.

La rilevanza di un **approccio LCA** dalla culla alla tomba

È opinione consolidata nella comunità scientifica indipendente che, dal punto di vista progettuale, la soluzione migliore in un'ottica di decarbonizzazione, sostenibilità ambientale ed economia circolare, debba essere trovata caso per caso [3], utilizzando i principi dell'analisi del ciclo di vita applicati a ipotesi contestualizzate (e non a modelli teorici) considerando quindi le condizioni locali specifiche quali la disponibilità di materie prime, i mix energetici nazionali, le tecnologie di demolizione e smaltimento tecnicamente adottabili. Pertanto, sulla base di questo assunto, ogni decisione in merito alle politiche di sostenibilità in edilizia, dovrebbe essere basata sull'analisi del ciclo di vita del "prodotto" finale (edificio o infrastruttura) evitando di promuovere genericamente tecnologie e materiali specifici, slegati dal contesto di intervento. La collocazione dell'edificio sul territorio è importante nella valutazione della costruzione così quanto lo sono le soluzioni tecnologiche adottate, in relazione

appunto ai requisiti specifici del luogo che determinano le condizioni di produzione dei materiali e le caratteristiche dei sistemi di trasporto [4]. Inoltre, regioni climatiche diverse esigono diverse prestazioni termiche, riflesse nei regolamenti edilizi nazionali e declinate in soluzioni conformi con prestazioni diversamente caratterizzate [5]. In aggiunta, mercati locali o regionali possono offrire opportunità diversificate in relazione al numero e tipo di industrie produttrici di materie prime attive localmente [6]. Tutti questi aspetti, combinati fra loro, influenzano le prestazioni ambientali di un edificio e determinano la selezione dei materiali condizionando i risultati di ogni eventuale confronto tra le diverse alternative possibili [7].

Con questo obiettivo, il gruppo di lavoro TC350 del CEN ha lavorato accuratamente negli ultimi 10 anni, di concerto con i principali stakeholder in ambito edilizio e con i referenti dei diversi Stati membri, per lo sviluppo di un quadro normativo per la valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici secondo la metodologia LCA.

La norma EN 15978:2011 *Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo* definisce una nomenclatura comune e linee guida per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio, sulla base dell'"equivalente funzionale"[8].

L'equivalente funzionale è una rappresentazione delle caratteristiche tecniche e delle funzionalità richieste dell'edificio. È il mezzo con cui le caratteristiche dell'edificio vengono razionalizzate in una descrizione minima dell'oggetto di valutazione (adattata da ISO 21931-1:2010).

La norma stabilisce che i confronti tra i risultati delle valutazioni di edifici o sistemi assemblati (parte di opere) - in fase di progettazione o ogni volta che i risultati sono utilizzati - debbano essere effettuati **solo sulla base della loro equivalenza funzionale**. Ciò richiede che i principali requisiti funzionali siano descritti insieme all'uso previsto e ai relativi requisiti tecnici specifici. Questa descrizione consente di determinare l'equivalenza funzionale di diverse opzioni e tipi di edifici e costituisce la base per un confronto trasparente e imparziale. Di fatto, per garantire obiettività e valenza scientifica dei risultati della analisi LCA, la norma esclude la possibilità di ogni confronto tra edificio o parti di esso che non sia condotto a parità di metodo LCA e a parità di equivalente funzionale ed esclude ogni possibilità di confronto tra materiali, in accordo con quanto più chiaramente esplicitato in EN15804:2019 [9].



Villa e azienda agricola, Gassino Torinese - F.L. Architetti FLarchitetti (pubblicato su CIL187)

Per rendere più chiaro il concetto è forse opportuno elencare alcuni esempi pratici volti a determinare le condizioni minime atte a garantire la validità tecnica di un confronto tra prodotti edilizi per la determinazione della soluzione a minor impatto ambientale:

- non è possibile eseguire il confronto tra un blocco in laterizio e un blocco in legno-cemento aventi le medesime dimensioni, ma è possibile realizzare un confronto tra 1m² di parete di tamponamento realizzata con blocchi in laterizio avente (ad esempio) trasmittanza termica $U= 0,23\text{W/m}^2\text{K}$ e una parete di tamponamento realizzata con blocchi in legno-cemento avente medesima trasmittanza termica $U= 0,23\text{W/m}^2\text{K}$
- non è possibile realizzare il confronto tra le due pareti di cui al punto precedente, se la metodologia LCA utilizzata per determinare gli impatti di entrambi i prodotti edilizi non è la stessa, ossia non è possibile confrontare gli impatti ambientali di una parete calcolati secondo la EN15804+A2 con gli impatti di una parete calcolati secondo EN15804+A1 o ISO 14040
- non è possibile realizzare il confronto tra le due pareti precedenti se per entrambe non sono stati valutati gli impatti delle fasi del ciclo di vita A1-A3 (produzione), C1-C4 (fine-vita) e D (riuso e riciclo). Ossia non è possibile confrontare due prodotti edilizi sulla base degli impatti ambientali relativi alla sola fase di produzione.

Durabile
significa
sostenibile

La EN15804:2019, definendo le regole di categoria di prodotto per la elaborazione delle Dichiarazioni Ambientali sulla base di informazioni e metodologie armonizzate, fornisce di fatto la base informativa per la valutazione della sostenibilità ambientale a scala di edificio attraverso:

- dati tecnici o scenari verificabili e coerenti relativi al prodotto per la valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici
- dati tecnici verificabili e coerenti relativi al prodotto o scenari potenzialmente correlati alla salute degli utenti per la valutazione delle prestazioni degli edifici.

La norma inoltre garantisce, attraverso la sua corretta applicazione:

- **che i confronti tra prodotti da costruzione siano effettuati nell'ambito della loro applicazione nell'edificio**
- la comunicazione delle informazioni ambientali dei prodotti da costruzione da un'impresa all'altra
- la base, fatte salve ulteriori prescrizioni, per la comunicazione ai consumatori delle informazioni ambientali dei prodotti da costruzione.

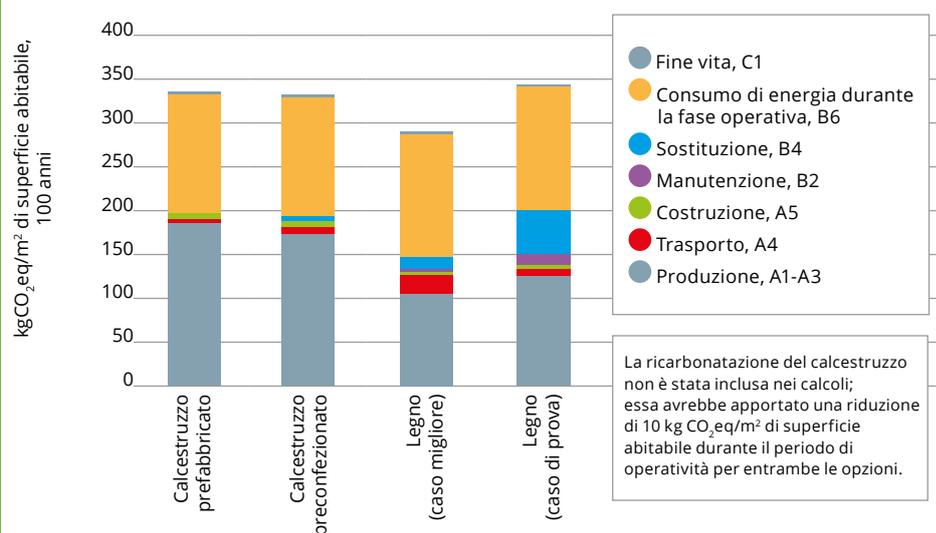
In contesti specifici, l'utilizzo della metodologia LCA ha consentito di evidenziare addirittura potenziali aggravamenti di impatto ambientale e/o incremento dei costi economici nel ciclo di vita derivanti da scelte tecnologiche orientate al raggiungimento degli standard NZEB. Uno studio condotto nell'ambito del progetto CONZ€Bs [55] su un edificio residenziale tipo a 4 piani (29 appartamenti con SU ~87m², 4 vani scale, un centro civico al piano terra), collocato in due zone termiche distinte, Roma e Torino, ha dimostrato come la soluzione più performante in termini ambientali ed economici, in una prospettiva di ciclo di vita di 30 anni, sia quella che combina la scelta accurata di materiali e tecnologie costruttive a soluzioni impiantistiche ottimizzate in relazione al mix energetico e al clima specifico, escludendo la possibilità di limitare ogni valutazione alla sola selezione dei materiali da costruzione.

Uno studio condotto nel 2015 dal *Technical Research Institute of Sweden AB* [3], con l'obiettivo di raccogliere e valutare informazioni e dati sugli impatti climatici ed energetici nel ciclo di vita di soluzioni diverse di involucro edilizio e rivestimento di facciata per edifici residenziali tipo

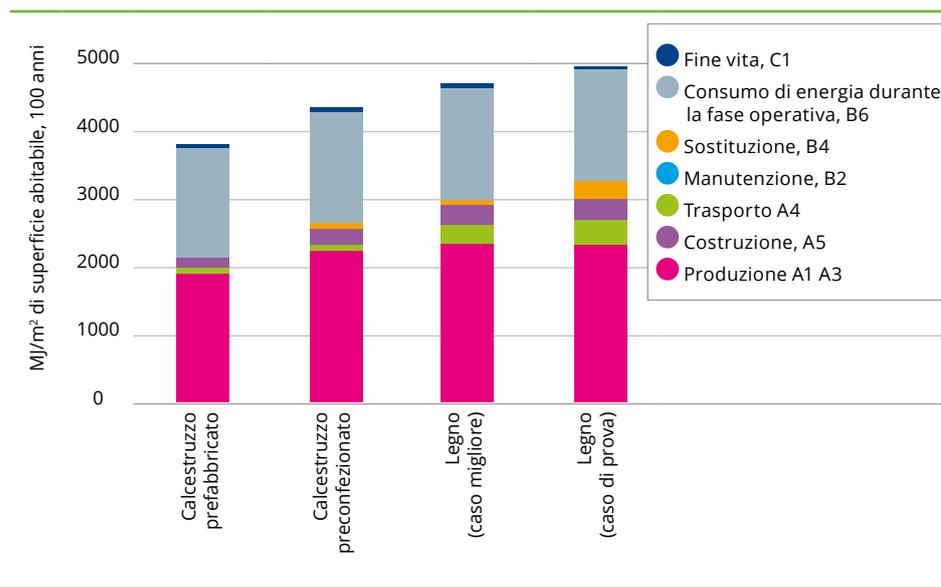
IMPATTO CLIMATICO NEL CORSO DI 100 ANNI

Figura 1

Confronto tra le emissioni di CO₂, eq. delle 3 diverse soluzioni di involucro in un ciclo di vita di 100 anni. La struttura in legno è stata simulata secondo due diversi scenari: il primo basato sulle informazioni del produttore (best case) il secondo sulle informazioni derivate dalla bibliografia scientifica (proven cases)



in Svezia, ha dimostrato infatti che, ove il processo progettuale includa una selezione attiva dei fattori di maggior rilevanza, quali la selezione dei materiali, il sistema di trasporto e approvvigionamento, i sistemi di condizionamento climatico, ecc., non sussistono differenze sostanziali, relativamente agli impatti sulle emissioni di CO₂ o sul consumo di energia primaria, legate ai diversi materiali impiegati, e, nello specifico dello studio, tra strutture in calcestruzzo prefabbricato, calcestruzzo gettato in opera e legno strutturale poste a confronto durante il ciclo di vita dell'edificio.



ENERGIA PRIMARIA NEL CORSO DI 100 ANNI

Figura 2 Confronto tra le energie primarie delle diverse soluzioni di involucro in un ciclo di vita di 100 anni. La struttura in legno è stata simulata secondo due diversi scenari: il primo basato sulle informazioni del produttore (best case) il secondo sulle informazioni derivate dalla bibliografia scientifica (proven cases). Nel calcolo non è stata inclusa la ricarbonatazione del calcestruzzo²

Come evidenziato dai grafici di Figura 1 e di Figura 2, le selezioni attive in fase progettuale, consentono di ridurre significativamente gli impatti ambientali ed il consumo energetico complessivi dell'opera edilizia per lo scenario in calcestruzzo (prefabbricato o gettato in opera), ma evidenziano altresì, la notevole discrepanza tra gli scenari best case e proven case. I grafici sottolineano quindi l'estrema rilevanza di una valutazione accurata, e basata su scenari reali e non ipotetici, della durata di vita dell'edificio e dei suoi componenti, che deve essere correttamente stimata in fase progettuale e soprattutto garantita in uso, pena il rischio di generare, nel ciclo di vita, impatti ambientali e consumi energetici notevolmente più

² La ricarbonatazione è stata inserita fra le leve disponibili per raggiungere nel 2050 la carbon neutrality del settore del cemento sia nella roadmap di Federbeton, che di Cembureau, l'Associazione europea dei produttori di cemento. Un riferimento utile per il calcolo della CO₂ sequestrata con la ricarbonatazione delle strutture in calcestruzzo è la norma UNI EN 16757 ed il Technical Report CEN-TR 17310:2019, che integra tale norma. È stato inoltre realizzato da parte dell'IVL (Swedish Environmental Research Institute) un report, disponibile a questo link <https://www.ivl.se/co2-uptake-concrete> insieme a dettagliate informazioni sul fenomeno della ricarbonatazione e su come conteggiare il relativo contributo, anche con riferimento ai National Inventory Report sulle emissioni di gas serra. Di recente, anche l'IPPC ha riconosciuto l'assorbimento di CO₂ associato al fenomeno della ricarbonatazione del calcestruzzo nel report di agosto 2021 "Climate Change 2021 - The Physical Science Basis".

alti rispetto a quelli stimati³.

I vantaggi ambientali (ed economici) della durabilità di un edificio sono notoriamente riconosciuti. Un edificio durevole - di lunga durata - prevede un lungo periodo di tempo per ammortizzare i costi ambientali ed economici che sono stati sostenuti per costruirlo e la scelta di prodotti e materiali durevoli comporta interventi di sostituzione e riparazione meno frequenti, con ulteriore riduzione dei consumi di materie prime ed energie e degli impatti ambientali associati alla loro trasformazione e produzione. Nella progettazione di edifici sostenibili, durabilità e basso tasso di manutenzione sono criteri da considerare congiuntamente nella scelta di un materiale.

Uno studio spagnolo [59], ha confrontato le valutazioni LCA condotte su un edificio residenziale di 8 piani costruito nel 1956 con struttura in cemento armato e tamponamento in laterizio, con tetto a falde in tegole di laterizio, quando questo sia sottoposto a riqualificazione energetica o a demolizione e ricostruzione, dimostrando come, l'ipotesi di riqualificazione energetica secondo i più restringenti standard in vigore, in una ipotesi di RSL di 100 anni garantisca i livelli più bassi di emissioni di CO₂.

Obiettivo primario di ogni studio LCA è infatti quello supportare il processo decisionale nella fase iniziale di progettazione per fornire una guida e un monitoraggio della progettazione, in modo efficace e tempestivo. L'utilizzo delle simulazioni LCA fornisce dati quantitativi, in modo tale che il team di progetto possa confrontare le diverse alternative e scegliere quella con maggiori vantaggi in relazione al contesto specifico di intervento o agli obiettivi puntuali del progetto [10].

Questo aspetto assume rilevanza ancora maggiore oggi, in presenza di edifici, coerenti con le prescrizioni nZEB, che presentano impatti ambientali minori durante la fase di uso a causa della forte contrazione dei consumi per la climatizzazione ma, al contrario un incremento dei costi ambientali legati alle operazioni di costruzione, manutenzione e ristrutturazione [11].

La prossima frontiera, quindi, è quella di aggredire il carbonio incorporato nella materia con cui gli edifici non solo sono costruiti, ma anche con cui sono mantenuti efficienti nel corso della vita utile. A scala globale, abbiamo bisogno di realizzare edifici carbon-neutral quando non addirittura carbon-positive nel ciclo di vita e non limitatamente alla sola fase di estrazione/produzione.

³ Per la determinazione della durata di vita della struttura in legno nello scenario 2, è stato adottato il metodo definito in "The durability of outdoor timber above ground: Guide for design and material selection" che tiene conto sia del design specifico che del contesto climatico. Il metodo è stato sviluppato nell'ambito del programma di ricerca settoriale (BFP) per la foresta e il settore del legno, via WoodBuild, con l'obiettivo di costituire un tool di supporto per la progettazione della durabilità e service life delle strutture in legno per esterni.

Gli impatti ambientali dell'edificio nel ciclo di vita

Il volume *Embodied Carbon in Buildings* [16], fornisce il più recente riferimento scientifico, elaborato con il contributo di oltre 50 esperti da tutto il mondo, per la misurazione, gestione e mitigazione degli impatti degli edifici durante l'intero ciclo di vita.

L'articolo di Davies et. al. *Quantifying Environmental Impacts of Structural Material Choices Using Life Cycle Assessment: A Case Study* [17], mette a confronto gli impatti lungo le fasi A1-A3 (produzione), A4-A5 (trasporto e messa in opera), B2-B4 (uso), C2-C4 (fine vita), D (riciclo e riuso) dello stesso edificio (un edificio per uffici alto 7 piani), realizzato con 4 tecnologie costruttive diverse:

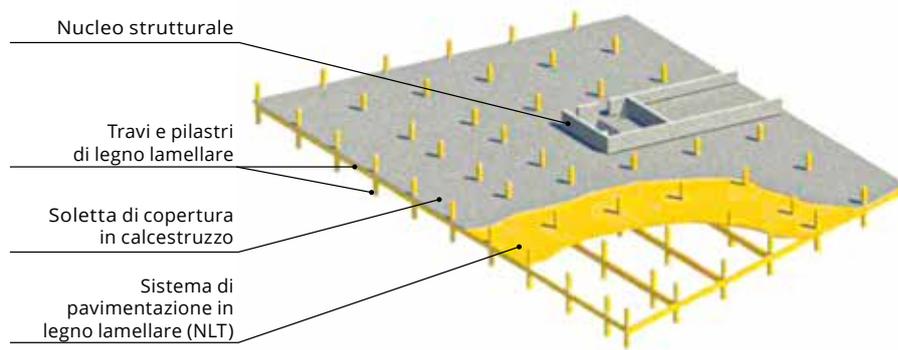
- **design A:** travi e pilastri in legno lamellare con pavimentazione in legno lamellare (NLT) (incluso massetto acustico di ripartizione in calcestruzzo) fuori terra, con una soletta in cemento armato al livello 1 e 2, con pilastri in calcestruzzo armato al di sotto del livello 2
- **design B:** travi e colonne in acciaio con soletta in calcestruzzo su solaio in lamiera ondulata fuori terra e soletta in calcestruzzo al livello 1 con colonne in calcestruzzo sotto terra
- **design C:** solette in calcestruzzo post-teso fuori terra, soletta in calcestruzzo al livello 1 con pilastri in calcestruzzo armato
- **design D:** solette in cemento con pilastri in calcestruzzo armato.

I risultati della valutazione LCA (Figura 12) offrono interessanti spunti di riflessione:

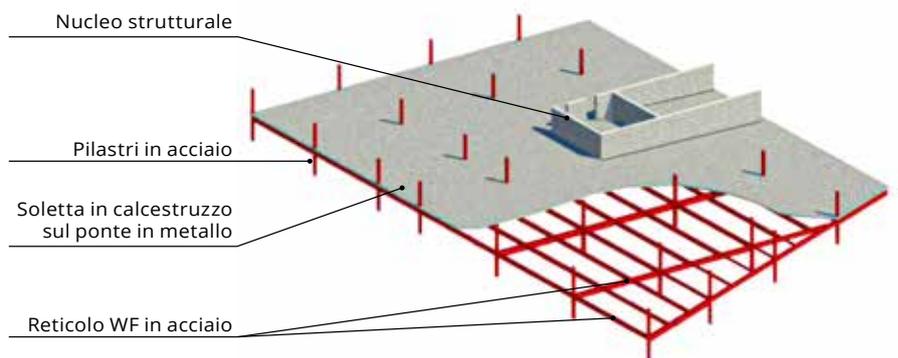
- limitando la valutazione alla sola fase di produzione, il design A risulta caratterizzato dal minore impatto ambientale (per l'indicatore GWP) inglobato nei materiali da costruzione
- ampliando lo scenario di analisi alle fasi di uso e fine vita, le relazioni tra le colonne variano significativamente e il design A comporta, con una *reference service life* di 60 anni, gli impatti più alti (per l'indicatore GWP) assieme al design D.

In uno scenario *cradle to gate*, è comunque importante però sottolineare,

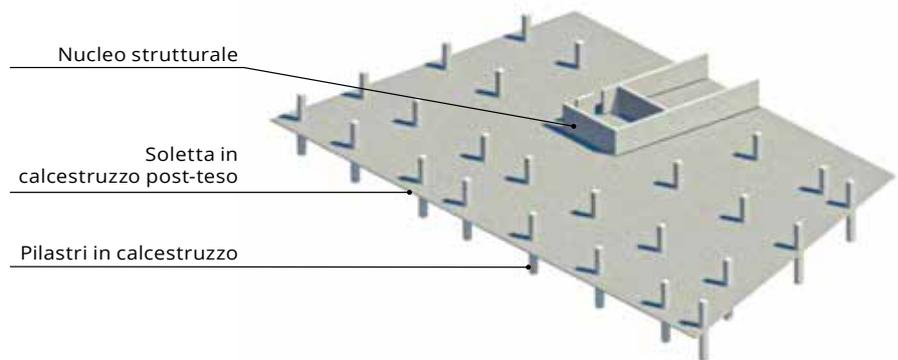
DESIGN A



DESIGN B



DESIGN C



DESIGN D

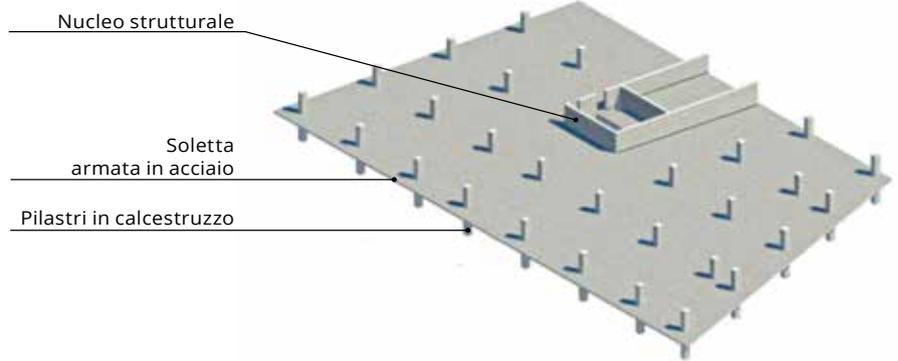


Figura 3
le quattro soluzioni
tecnologiche alternative

come riporta lo studio di Passer A. et al [18], che gli impatti associati alla costruzione in legno non sono inferiori in valore assoluto rispetto ad altri sistemi costruttivi, ma lo possono essere, solo in determinate condizioni e contesti relativamente ad alcuni indicatori specifici. I risultati (Figura 4) di uno studio condotto su un caso studio di edificio per uffici realizzato con tre sistemi costruttivi alternativi (cemento armato, acciaio, legno), mostrano che le prestazioni ambientali di tutti i sistemi di costruzione portanti sono molto simili, anche se a scala diversa tra i vari indicatori.

Contrariamente ai dati di LCI, la rilevanza in termini di massa del calcestruzzo non trova evidente riscontro nei risultati dell'LCIA. Nella analisi di dettaglio, emerge l'alto valore POCP⁴ della costruzione in legno, causato dall'impiego di legno lamellare incollato (GLT), che influenza anche gli altri indicatori ODP, AP, EP, HTP e CEDnr⁵.

I risultati indicano anche che l'acciaio strutturale e le piastre di collegamento impiegate nelle costruzioni in legno svolgono un ruolo significativo nella LCIA e dovrebbero quindi sempre essere incluse nei confini del sistema di analisi e incluse in una valutazione degli effettivi impatti ambientali associati alla costruzione in legno.

In ambito europeo, uno degli studi più completi sul tema, è stato condotto dalla Austrian Cooperative Research (ACR) con lo scopo di fornire una risposta alla domanda su quale sia la costruzione più sostenibile. Sono stati individuati i metodi costruttivi maggiormente utilizzati (laterizio, calcestruzzo, legno-cemento, telaio in legno e legno massiccio) combinando le diverse soluzioni tecniche con i requisiti energetici minimi previsti dalle più recenti normative e includendo nella analisi anche i sistemi impiantistici (riscaldamento a pellet, pompe di calore, solare termico, fotovoltaico, ecc.). Da questa combinazione sono scaturite 45 varianti i cui impatti sono stati valutati in un ciclo di vita di 100 anni.

Di seguito sono riportati i risultati dello studio per le seguenti tipologie:

- muratura portante in laterizio
- muratura in laterizio con isolamento
- legno massiccio con isolamento
- telaio in legno con isolamento

impiegati per la realizzazione di una abitazione a basso consumo energetico (40 kWh/m²).

4 POCP Photochemical ozone creation potentials

5 ODP Ozone Depletion Potential, AP Acidification Potential, EP Eutrophication Potential, HTP Human Toxicity Potential e CEDnr non-renewable cumulative energy demand, TEPT Terrestrial ecotoxicity

IMPATTI AMBIENTALI

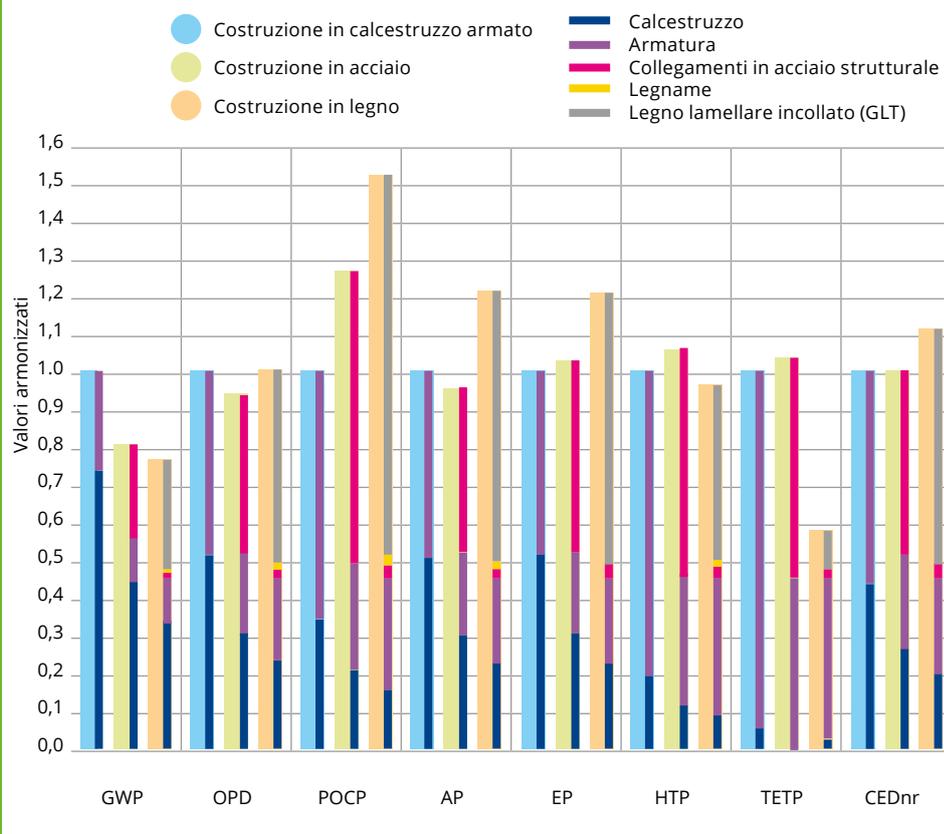


Figura 4

Confronto tra gli impatti ambientali di tre sistemi costruttivi alternativi, espressi per m² e armonizzati sulla base della costruzione in c.a.

ENERGIA PRIMARIA DA FONTI ENERGETICHE NON RINNOVABILI (MJ/m² a)

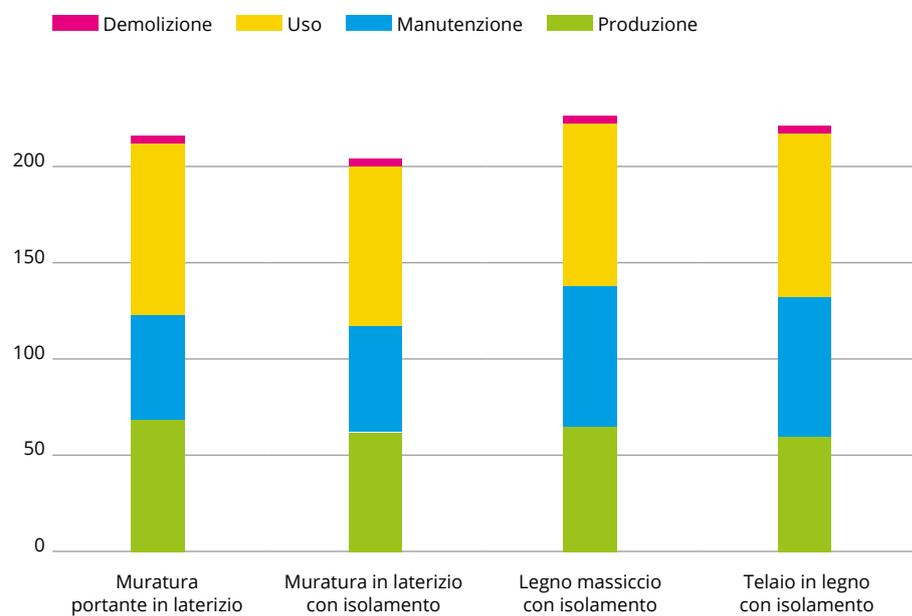
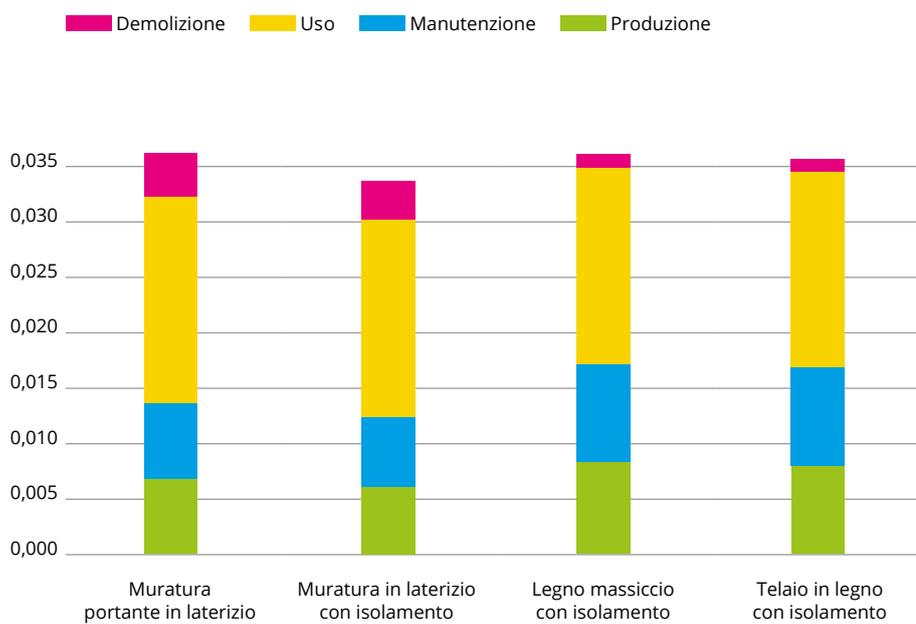


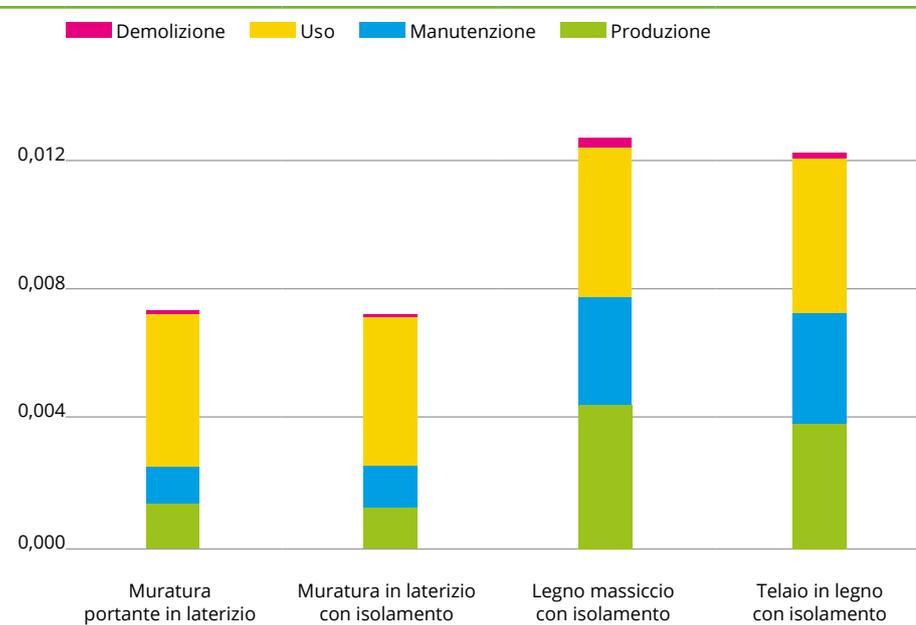
Figura 5

Energia primaria da fonti energetiche non rinnovabili per le diverse fasi del ciclo di vita.



POTENZIALE DI EUTROFIZZAZIONE (EP)
(kg PO₄⁻³ eq/m² a)

Figura 6
Potenziale di eutrofizzazione (EP) per le diverse fasi del ciclo di vita



POTENZIALE DI FORMAZIONE DELLO STRATO DI OZONO FOTOCHIMICO
(kgC₂H₄ eq/m² a)

Figura 7
Potenziale di formazione dello strato di ozono fotochimico (POCP) per le diverse fasi del ciclo di vita

POTENZIALE DI ESAURIMENTO DELL'OZONO STRATOSFERICO (kg CFC⁻¹¹ eq/m² a)

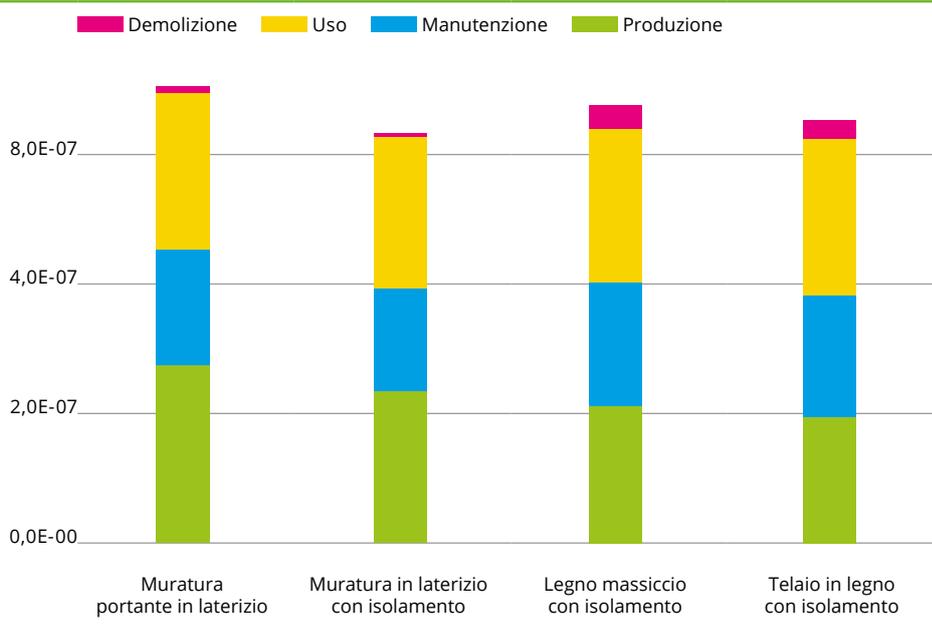


Figura 8

Potenziale di Esaurimento dell'ozono Stratosferico (ODP) per le diverse fasi del ciclo di vita

POTENZIALE DI RISCALDAMENTO GLOBALE (GWP) (kg CO₂ eq/m² a)

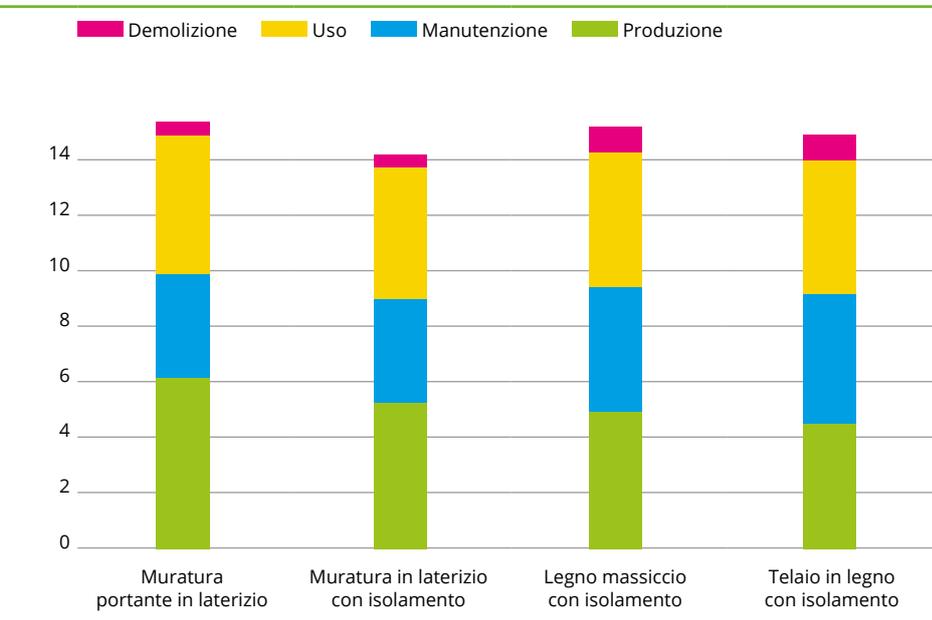


Figura 9

Potenziale di riscaldamento globale (GWP) per le diverse fasi del ciclo di vita

I risultati di cui alle Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9, confermano quanto emerso dai risultati degli studi fin qui esposti, avvalorando la tesi che, in uno scenario di vita completo, che tenga conto della durabilità effettiva dei materiali in opera e dell'intero ciclo di vita dell'edificio, inclusa manutenzione e demolizione/smaltimento, **non è possibile affermare che le costruzioni in legno comportino un minor impatto ambientale legato alle emissioni di CO₂** e che, relativamente agli altri indicatori ambientali obbligatori in una analisi LCA conforme agli standard europei CEN, **le costruzioni in legno è confermato scontino impatti ambientali maggiori** (POCP, ODP, AP, EP).

Tutti i risultati delle indagini e degli studi finora condotti, in uno scenario *cradle to gate*, rischiano poi di dover essere sovrascritti dalle più recenti indagini che prendono a riferimento nuovi materiali, sviluppati, grazie all'innovazione tecnologica, in relazione alle pressioni della politica EU per un incremento della percentuale di riciclo e riuso delle materie prime anche nel settore delle costruzioni.

In media, in un edificio *low-energy*, l'incidenza degli impatti ambientali relativi ai materiali sul bilancio di energia complessivo dell'edificio (incorporata e operativa) è pari al 30-50% [13] e, secondo Berggren et al. 2013 [14], in un edificio *net-zero*, gli elementi strutturali contengono fino al 60% di questa energia incorporata. Di conseguenza, il potenziale di riciclo dei materiali da costruzione costituisce un aspetto significativo in termini di impatto del ciclo di vita dell'edificio in quanto potrebbe equivalere fino al 15% dell'energia totale dell'edificio [15].

Di conseguenza, per limitare l'estrazione di materie prime e le emissioni associate al trasporto e alla produzione di materiali da costruzione, la ricerca tecnologica degli ultimi anni, ha portato alla progettazione di nuovi materiali che fanno largo impiego di sottoprodotti industriali e materiali di scarto come sabbia di fonderia, loppa d'altoforno granulata macinata, scorie di acciaio, scorie di rame, ceneri pesanti, ceneri leggere, fumi di silice, cenere di pulla di riso, bagassa di canna da zucchero e altri composti in grado di migliorare le prestazioni strutturali e ambientali degli edifici se utilizzati al posto degli aggregati [19].

È dimostrato come il riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) concorra significativamente alla riduzione dell'impatto ambientale e dei costi attribuibili ai materiali da costruzione: la ricerca più recente documenta la notevole riduzione dell'impronta di carbonio di un edificio raggiunta grazie all'aggiunta sia di sottoprodotti industriali che di aggregati riciclati [20,21,22].

Lo studio di Zeit. A., et al. [23] ha dimostrato ad esempio come l'impiego del legno massiccio in edilizia perda ogni vantaggio ambientale, con

particolare riferimento a GWP (*embodied carbon*⁶) ed energia incorporata (*embodied energy*⁷) qualora si utilizzino, in alternativa, acciaio e calcestruzzo con alto contenuto di riciclato (*best practices*).

Lo studio, si concentra sul confronto tra 4 diverse strutture per un edificio destinato a parcheggio, a parità di equivalente funzionale (caratteristiche di sismicità, capacità portante, layout strutturale): c.a. prefabbricato, c.a. post-teso, acciaio, legno.

Figura 10
Carbonio incorporato per unità di superficie (kgCO₂e/m²) per ognuno dei 4 casi studio – cradle to gate

Struttura principale	Pratiche peggiori	Pratiche migliori
Calcestruzzo prefabbricato	80	52
Acciaio	107	41
Calcestruzzo post-teso	80	46
Legno	67	37

Figura 11
Energia incorporata per unità di superficie (MJ/m²) per ognuno dei 4 casi studio – cradle to gate

Struttura principale	Pratiche peggiori	Pratiche migliori
Calcestruzzo prefabbricato	1,300	860
Acciaio	2,300	950
Calcestruzzo post-teso	1,500	850
Legno	1,652	970

Le soluzioni *best practices*, sono state elaborate considerando alcuni scenari plausibili di sostituzione del cemento portland con ceneri volanti (25-50%), di utilizzo di acciaio con alto contenuto di riciclato (93%). Per le strutture in legno, *worst practices* rappresenta lo scenario in cui, nei calcoli, è stato computato anche il carbonio biogenico, oltre a quello fossile. Il valore relativamente alto di energia incorporata nella struttura in legno era già stato riscontrato in precedenti studi [24].

Questo scritto mostra che l'impiego di legno strutturale, in una media tra i valori migliore e peggiore, consente, in relazione agli indicatori di carbonio ed energia incorporata, guadagni marginali rispetto ad altri materiali tradizionali. Questi guadagni peraltro sono inferiori ad un valore di tolleranza $\pm 30\%$ [25] che tutt'oggi rappresenta il margine di incertezza per analisi LCA condotte a partire da dati generici.

6 Per carbonio incorporato si intende tutta la CO₂ emessa nel processo di produzione dei materiali. È stimato sulla base della energia utilizzata per estrarre e trasportare le materie prime e dalle emissioni derivanti dai processi di produzione

7 L'energia incorporata è l'energia totale richiesta per l'estrazione, la lavorazione, la produzione e la realizzazione degli edifici. A differenza della valutazione del ciclo di vita, che valuta tutti gli impatti durante l'intera vita di un materiale o di un elemento, l'energia incorporata considera solo l'aspetto frontale dell'impatto di un materiale da costruzione. Non include l'uso o lo smaltimento dei materiali a fine vita (fonte EU)

In conclusione, il legno presenta prestazioni di impatto comparabili con i sistemi costruttivi standard in acciaio, calcestruzzo e laterizio. Gli eventuali vantaggi che verrebbero associati alla leggerezza del legno e allo stoccaggio di carbonio durante la sua fase di accrescimento, nella progettazione di un sistema edilizio possono tradursi in elementi penalizzanti, soprattutto quando la valutazione tiene correttamente conto delle fasi del ciclo di vita successive alla produzione.

L'importanza del **fine vita** dell'**edificio**

In uno scenario *cradle to grave*, infatti, due sono i fattori significativi che l'articolo di Davies D., et. al. [17], già menzionato nel capitolo precedente, individua per la determinazione della prestazione ambientale nel ciclo di vita:

1. la necessità di integrare gli elementi strutturali in legno con elementi collaboranti in calcestruzzo/acciaio al fine di soddisfare i requisiti prestazionali minimi (garantendo così l'equivalenza funzionale per il confronto) previsti dalle normative vigenti (nello specifico una soletta di calcestruzzo di 7 cm, per rendere conforme la prestazione acustica del solaio in legno a quella degli altri sistemi); infatti un sistema costruttivo in legno per assicurare idonei livelli prestazionali necessita sempre dell'integrazione con altri materiali
2. l'adozione di uno scenario di fine vita coerente con le indicazioni delle PCR di settore (per i prodotti in legno le PCR utilizzate nello studio prevedono l'incenerimento).

Dalla comparazione dei grafici di Figura 12, emerge chiaramente il peso della fase di fine vita dell'edificio dal momento che lo scenario di gestione e trattamento dei rifiuti C&D può variare in maniera estremamente significativa non solo a livello nazionale, ma localmente in relazione alle filiere del rifiuto effettivamente attive sui diversi territori, invertendo così i risultati di una valutazione condotta solo fino al cancello.

I risultati dei confronti condotti in [17], sulla base degli scenari di fine vita definiti nelle diverse PCR danno l'occasione per evidenziare ulteriori

SCENARIO
CRADLE TO GATE

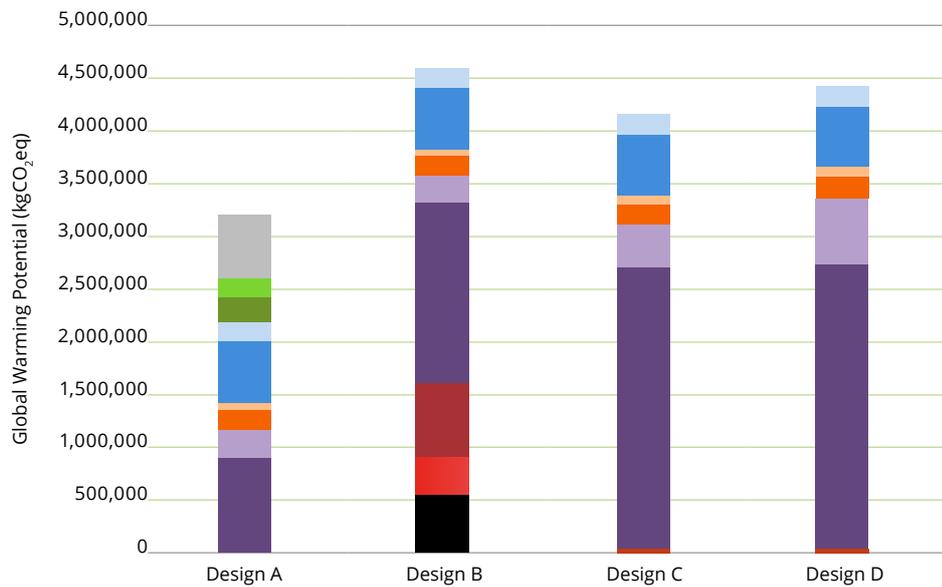
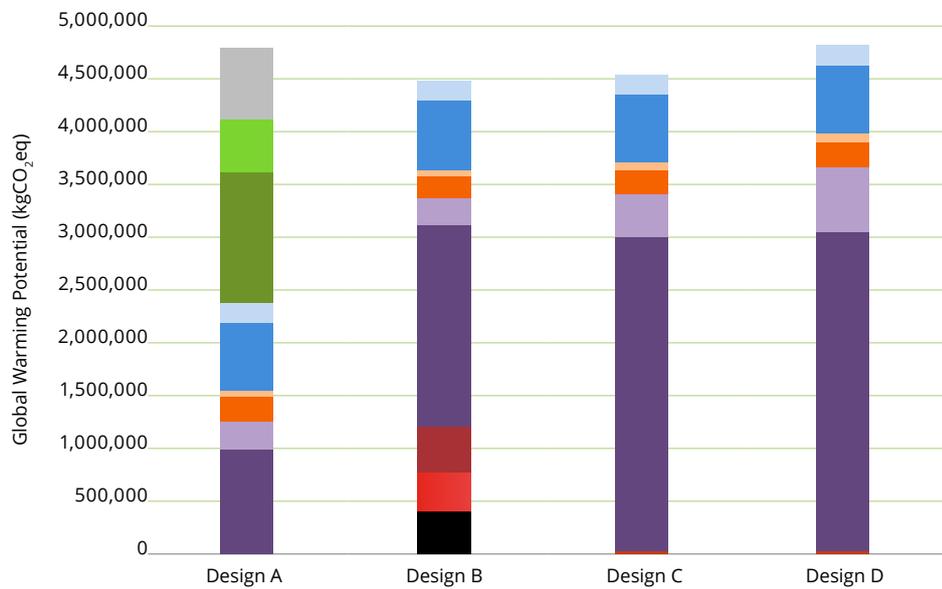
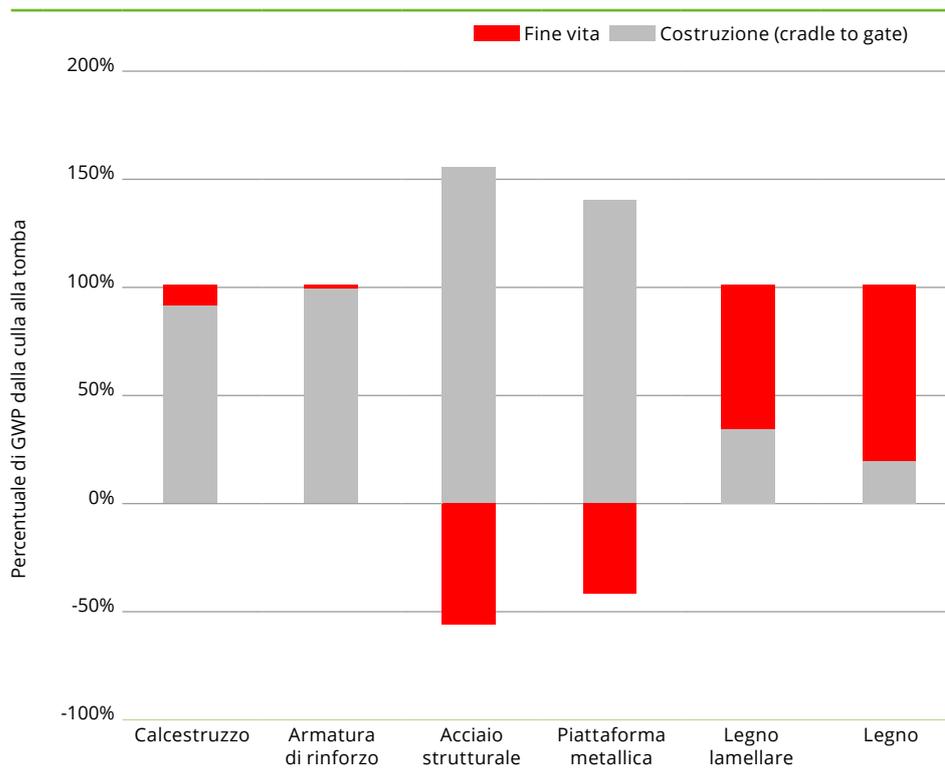


Figura 12
Risultati a confronto degli impatti ambientali relativi all'indicatore GWP dei 4 diversi design strutturali, così come descritti in figura 3, in uno scenario cradle to gate (in alto) e in uno scenario cradle to grave (in basso)

- Soletta di copertura
- Travi/pilastrini (legno lamellare)
- Pavimenti - NLT & compensato
- Muro - armatura
- Muratura - calcestruzzo
- Fondazioni - armatura
- Fondazioni - calcestruzzo
- Pavimenti - armature
- Pavimenti/SOG - calcestruzzo
- Acciaio strutturale
- Antincendio
- Piattaforma metallica

SCENARIO
CRADLE TO GRAVE





PERCENTUALE DI GWP CRADLE TO GRAVE

Figura 13
Origine degli impatti di GWP nel ciclo di vita (cradle to grave) suddivisi per materiale

elementi di criticità legati ad una troppo superficiale lettura delle informazioni ambientali di prodotto:

1. nello specifico della analisi sull'indicatore GWP, tanto per i materiali lignei (legno lamellare o legno massiccio) quanto per l'acciaio (sia acciaio strutturale che in forma di lamiera), assumono particolare rilevanza le impostazioni di calcolo (confini del sistema, regole di cut-off, regole di allocazione, scenari di analisi) definite dalle PCR e utilizzate quindi per l'elaborazione degli indicatori di impatto riportati nelle EPD
2. svolgono un ruolo cruciale la analisi e la valutazione della qualità dei dati secondari e generici impiegati per la costruzione dell'inventario LCI (come peraltro specificatamente richiesto dagli standard CEN specifici per il settore delle costruzioni e obbligatorio per la convalida delle EPD) poiché il valore di alcuni indicatori (come ad esempio il GWP) viene determinato da queste impostazioni. Nel caso specifico, il database utilizzato per lo studio, ad esempio, ignora gli impatti associati alla raccolta dei materiali legnosi, come la costruzione di strade di servizio o la degradazione ambientale del sito, o il mancato futuro sequestro di carbonio da parte delle piante abbattute.

GLOBAL WARMING POTENTIAL - CRADLE TO GATE VS CRADLE TO GRAVE

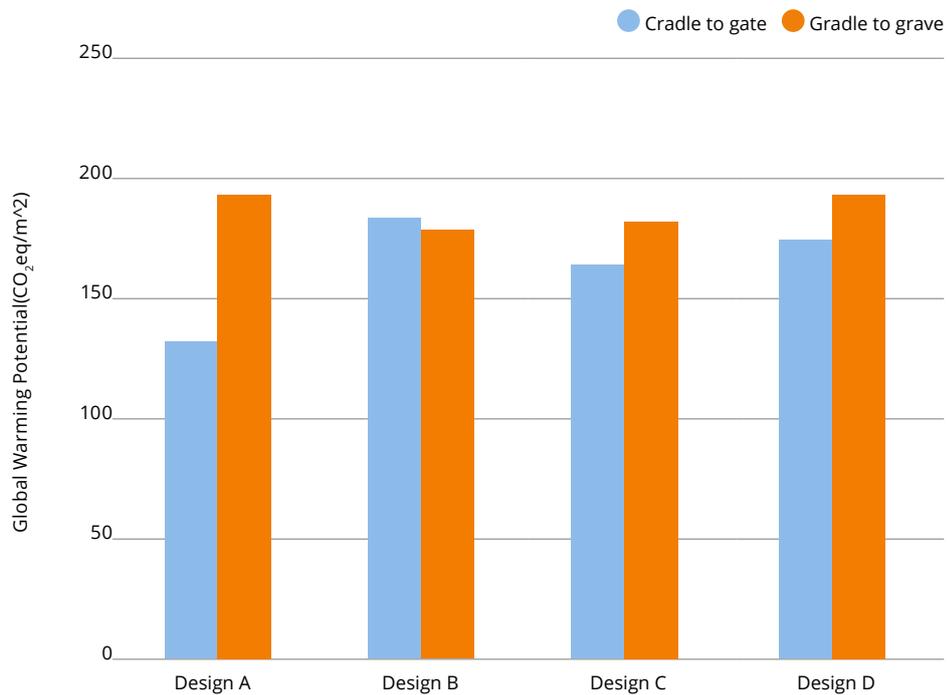


Figura 14
Differenza relativa tra l'intensità degli impatti relativi all'indicatore GWP nei due scenari di analisi cradle to gate e cradle to grave

Il record di database utilizzato per il legno presuppone inoltre che alla fine della vita dell'edificio il legno non venga riciclato ma, coerentemente con scenari di fine vita plausibili, che il carbonio sequestrato nel legno venga eventualmente rilasciato nell'atmosfera (ad es. tramite combustione o decomposizione), ragione quindi del significativo aumento del GWP nella struttura in legno nella fase di fine vita.

Poiché gli impatti relativi alla fase di uso degli edifici ad alte prestazioni diminuiscono in virtù del ridotto fabbisogno di energia primaria degli edifici N-ZEB rispetto agli edifici tradizionali, la ricerca scientifica ha spostato il proprio ambito di interesse verso i materiali e i loro impatti alla fine del ciclo di vita (EOL).

A seconda di quanto siano significativi gli effetti ambientali EOL, considerare e valutare correttamente questi impatti in anticipo nella progettazione di un edificio potrebbe influenzare gli impatti del ciclo di vita complessivo [13]: ciò è particolarmente rilevante per i materiali strutturali, in virtù della loro incidenza nel bilancio di massa.

L'incertezza nella valutazione del **contributo ambientale** legato al processo di sequestro di carbonio

È comunemente diffusa l'opinione che i materiali artificiali, quali acciaio e calcestruzzo, siano caratterizzati da impatti ambientali significativamente maggiori, a causa del consumo estensivo di energie e risorse necessarie alla loro estrazione, lavorazione, produzione e distribuzione. Questi impatti, vengono generalmente comparati con gli impatti (ritenuti in teoria) *carbon-neutral* delle strutture in legno.

Il motivo per cui il legno spesso rappresenta una alternativa intrigante dal punto di vista ambientale, è legato al processo di sequestro di carbonio, ossia alla capacità propria degli elementi vegetali di assorbire CO₂ durante il periodo di accrescimento e di stoccarla durante la fase di uso. Numerosi sono gli studi che, anche recentemente, hanno iniziato ad indagare con maggiore attenzione questo processo di sequestro di carbonio quale elemento discriminante nella valutazione degli impatti nel ciclo di vita del legno impiegato come materiale strutturale [27,28,29,30]. Ciò soprattutto in relazione al fine vita effettivo del materiale, ossia tecnicamente realizzabile e rappresentativo dello scenario corrente e più cautelativo al momento della analisi.

Questo a dimostrazione di quanto sia delicato l'equilibrio del bilancio di CO₂ nei materiali legnosi e dell'importanza di tener conto dei diversi scenari plausibili di fine vita (discarica, incenerimento con recupero energetico, incenerimento senza recupero energetico, riciclo) e dei relativi impatti del carbonio biogenico legati alla fase di smaltimento.

Le emissioni di CO₂ biogenico, derivanti cioè dalla degradazione o combustione della biomassa a fine vita, non sono infatti sempre considerate nelle valutazioni degli edifici e nelle analisi LCA in generale [31] e, ad oggi, non esiste un chiaro consenso sulle procedure di calcolo del flusso di assorbimento-rilascio del carbonio biogenico durante il ciclo di vita [40, 44, 45] con conseguenti gravi incertezze sulla qualità e confrontabilità dei risultati.

La modellazione di tali impatti richiede una solida comprensione del loro contributo alle concentrazioni di CO₂ in atmosfera e alla loro incidenza progressiva nel tempo. Stabilire linee guida consensuali per la valutazio-

ne del carbonio biogenico è necessario per ridurre al minimo le scelte metodologiche soggettive e per definire strategie efficienti di mitigazione del cambiamento climatico. Il ciclo di vita dei biomateriali è caratterizzato da periodi di emissioni e rimozioni di GHG; tenere conto del tempo può avere conseguenze significative sui risultati e, in alcuni casi, portare a conclusioni opposte [42]. Tuttavia, la dimensione temporale nell'LCA è un ambito di ricerca ancora poco esplorato.

La *literature review* dello studio di Hoxha E. et al [32], ha evidenziato nei 58 documenti analizzati (peer-reviewed papers, EPDs, reports e standards) una generale mancanza di coerenza in termini di scopo e l'utilizzo di diverse unità funzionali e metodi per la valutazione del carbonio biogenico, rendendo di fatto impossibile un confronto diretto tra gli studi.

L'ingerenza delle diverse metodologie (0/0, -1/+1, approccio dinamico, come dettagliate di seguito) utilizzate per la valutazione degli impatti ambientali legati ai processi di sequestro/emissione di CO₂ sulla qualità e attendibilità dei risultati dell'LCA è stata sottolineata dallo stesso studio [32], che, attraverso una valutazione LCA comparativa su un edificio in legno, ha evidenziato le possibili discrepanze tra i risultati ottenuti utilizzando diverse metodologie, misurate nel 16% a scala di edificio, e tra il 35% e il 200% a scala di componente edilizio. In particolare, questo studio ha evidenziato come, ogni valutazione LCA che limiti i confini del sistema di analisi alla sola fase di produzione (A1-A3), fornisca in realtà, relativamente all'indicatore GWP, risultati incompleti potenzialmente fuorvianti se utilizzati nei processi decisionali [32].

Infatti, le discrepanze tra la quota del contributo delle fasi del ciclo di vita all'impatto complessivo derivano dalle ipotesi utilizzate dai diversi approcci per il calcolo dell'assorbimento di carbonio biogenico. L'approccio 0/0 (*carbon neutrality*) non considera alcun beneficio dell'assorbimento di carbonio e di conseguenza anche il rilascio di carbonio dovuto alla combustione del legno non è considerato un impatto. L'approccio -1/+1 (suggerito dalla maggior parte degli standard quali ILCD:2010; EC 2013b; EN-16485:2014; ISO-14067:2018; ISO-21930:2017), considera i benefici dell'assorbimento del carbonio biogenico nelle fasi di produzione e costruzione e il suo rilascio nella fase di fine vita dell'edificio. Per questo motivo queste fasi presentano valori dell'indicatore GWP più bassi poiché gli impatti sono differiti alla fase di fine vita.

Secondo l'approccio -1/+1 utilizzato a scala di componente, l'impatto della fase di produzione può comportare valori negativi dell'indicatore GWP.

Tali valori negativi spesso motivano decisori, progettisti, professionisti, a suggerire l'uso di materiali e componenti a base biomassa degli edifici. Si tratta però di una informazione fuorviante perché l'impatto finale di tali materiali e componenti, se valutato nell'intero ciclo di vita, non è negativo.

Poiché si fa sempre più spesso affidamento sulla LCA per le la definizione di piani e strategie politiche, una valutazione errata del carbonio biogenico potrebbe portare a programmi inefficienti o controproducenti, nonché a opportunità mancate [40].

La sovrastima dei benefici derivanti dal sequestro di carbonio biogenico, quando si consideri nella analisi LCA la sola fase di produzione, è confermata anche da Vogtländer et al. [35].

Inoltre, entrambi questi approcci ignorano la relazione tra la RSL dell'edificio ed il periodo di rotazione della foresta, poiché la maggior parte degli studi LCA a scala di edificio, considera una RSL di 50 anni, mentre il ciclo di rotazione completo della foresta, che garantisce il completo assorbimento delle quantità di CO₂ stimate, è pari a 100 anni. In un approccio dinamico, in cui la allocazione degli impatti e dei benefici legati allo stoccaggio della CO₂ biogenica viene calcolata nella fase effettiva di sequestro/rilascio, l'influenza della gestione della foresta sul calcolo è ancora più rilevante: solo se la vita utile dell'edificio è pari al ciclo di ricrescita della foresta, si può infatti presumere la *carbon-neutrality* e la quantità di carbonio stoccata nell'edificio, valutata ai fini del calcolo dell'indicatore GWP, è quella effettivamente assorbita durante la vita utile dell'edificio (50 anni) e non durante un intero ciclo di rigenerazione della foresta. La differenza tra i valori dell'indicatore GWP calcolato con uno dei metodi statici e attraverso il metodo dinamico, può raggiungere il 29% (in una valutazione a scala di edificio) [34].

Tale discrepanza, è stata rilevata anche dalla Confederation of Finnish Construction Industries RT, nello studio "Carbon handprint of low-carbon building materials as part of regulation" condotto da Gaia Consulting nel 2021 che evidenzia come, "con cicli di vita più brevi rispetto al ciclo di rigenerazione, la raccolta del legname genera un debito di carbonio, ovvero riduce lo stoccaggio di carbonio della foresta".

Inoltre, sebbene la ricerca sullo stoccaggio di carbonio nei materiali *bio-based* sia oggi molto attiva, queste stesse pubblicazioni hanno evidenziato come un altro aspetto rilevante sul processo di sequestro del carbonio, ossia l'uso del suolo legato alla gestione delle foreste, sia al contrario spes-

EFFETTO SPECIFICO
DELLA CO₂ -
EMISSIONI DA EVITARE

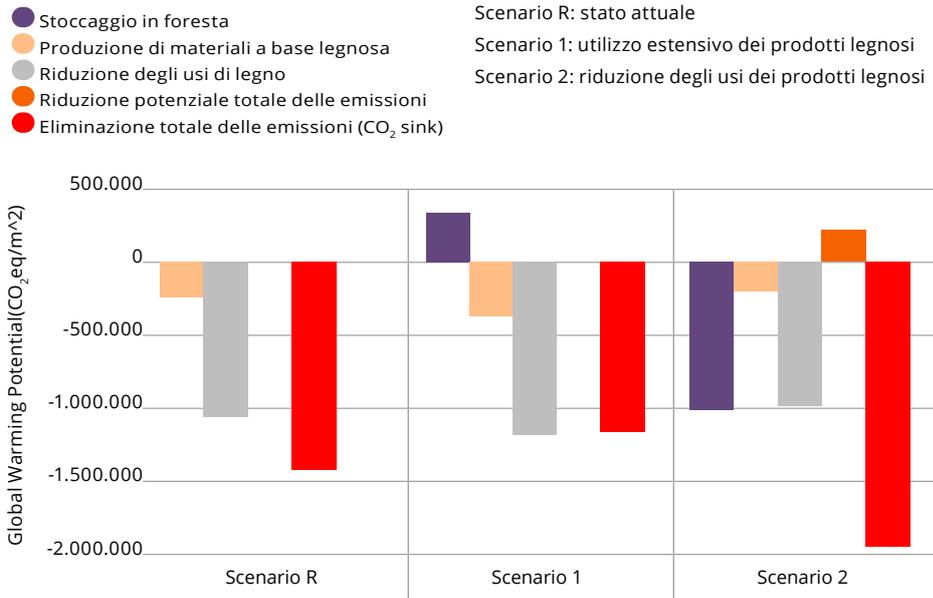


Figura 15
Effetti puntuali delle azioni intraprese per la riduzione delle emissioni di CO₂ nei tre diversi scenari

so sottovalutato. Erb et al. [33] hanno concluso che con le attuali condizioni climatiche, se non ci fossero foreste gestite dall'uomo, la vegetazione potenziale potrebbe immagazzinare il 49% in più di carbonio rispetto a quanto avviene attualmente. È quanto viene sostenuto anche dallo studio UE ClimWood2030 [56] che sottolinea come la riforestazione sia il modo più efficace per combattere il cambiamento climatico e che se niente cambierà nella gestione della filiera forestale, le foreste dell'UE dimezzeranno il loro potenziale di stoccaggio di CO₂ entro il 2100 [57]. Il grafico di Figura 15 riporta i risultati di uno studio in [58] in cui vengono confrontate le variazioni dei valori di CO₂ relative allo stoccaggio in foresta, alla produzione di materiali a base legnosa, alla riduzione degli usi di legno e alla riduzione potenziale totale delle emissioni nei tre scenari di analisi: stato attuale (R), utilizzo estensivo dei prodotti legnosi (1), riduzione degli usi dei prodotti legnosi (2).

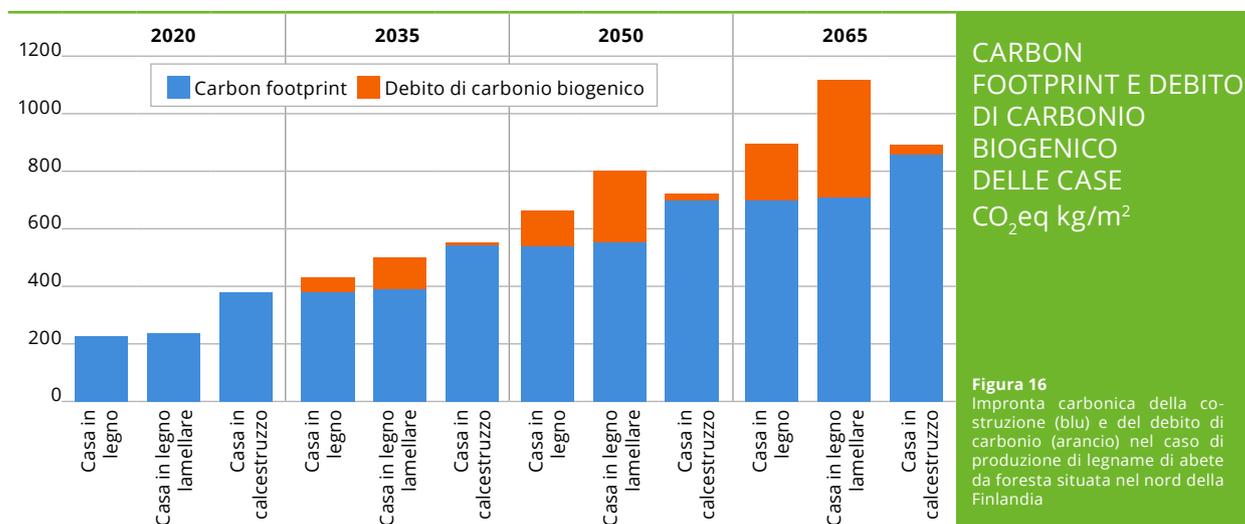
Pertanto, il contributo dell'indicatore *Land Use and Land Use Changes* (LU-LUC), è diventato un argomento complementare alla corretta valutazione degli impatti derivanti dal ciclo del carbonio biogenico per il calcolo dello score GWP. Nella situazione corrente, l'aumento dell'utilizzo di biomassa nelle industrie dei materiali, dei prodotti e dell'energia, comporta di fatto una riduzione dello stock di biomassa forestale, rispetto al potenziale esistente. Pertanto, con l'obiettivo di mantenere inalterata, a scala globale, la quantità di carbonio stoccata nelle foreste, la gestione delle stesse deve necessariamente seguire protocolli di sostenibilità certificati che portino ad un incremento della biomassa presente. L'aver considerato tali

emissioni all'interno delle valutazioni nazionali sugli impatti relativi all'uso del suolo, non costituisce motivo di elusione della valutazione del ciclo di carbonio biogenico dal ciclo di vita dei prodotti in legno.

In quest'ottica, le due norme ISO-21930 (2017) e EN15804:2021+A2:2019 hanno introdotto fattori di caratterizzazione⁸ per l'indicatore LULUC⁹ in base alla sostenibilità della gestione forestale. Una foresta gestita in modo non sostenibile ha un fattore di caratterizzazione di 1 kg CO₂e/kg CO₂, mentre la foresta gestita in modo sostenibile ha un fattore di caratterizzazione di 0 kg CO₂e/kg CO₂.

Il regolamento EU 2018/841 definisce le regole di inclusione delle emissioni e degli assorbimenti di gas a effetto serra risultanti dall'uso del suolo, dal cambiamento di uso del suolo nel quadro 2030 per il clima e l'energia della EU e, a livello italiano, fattori di caratterizzazione per l'indicatore LULUC pari a 0 possono essere adottati solo per le Managed Forest Land (MFL) come definite dal National Forestry Accounting Plan (NFAP) - Italy (2019).

Lo studio commissionato dalla *Confederation of Finnish Construction Industries RT* include anche una valutazione a confronto dei risultati di una analisi LCA condotta su un edificio residenziale di 5 piani, realizzato con 3 sistemi costruttivi alternativi (calcestruzzo, legno massiccio e legno lamellare CLT) e volto a stimare l'incidenza della inclusione del debito di carbonio biogenico, ossia degli effetti del disboscamento sullo stock di carbonio delle foreste, sulla *carbon footprint* dell'edificio.



CARBON FOOTPRINT E DEBITO DI CARBONIO BIOGENICO DELLE CASE
CO₂eq kg/m²

Figura 16
Impronta carbonica della costruzione (blu) e del debito di carbonio (arancio) nel caso di produzione di legname di abete da foresta situata nel nord della Finlandia

⁸ I fattori di caratterizzazione vengono applicati per convertire un risultato dell'analisi LCI nell'unità di misura dell'indicatore di impatto

⁹ Con il recente aggiornamento, lo standard EN15804:2021+A2:2019 ha introdotto, tra gli indicatori di impatto ambientale addizionali, anche l'indicatore Potential Soil Quality Index che descrive gli impatti relativi all'uso e alla qualità del suolo, secondo quanto indicato dal rapporto tecnico JRC *Land-use related environmental indicators for Life Cycle Assessment*

L'inclusione del debito di carbonio biogenico all'impronta di carbonio dell'edificio (proporzionale alla quantità di legname impiegata nella costruzione) modifica la prestazione relativa delle diverse soluzioni a confronto (Figura 16). Sebbene le emissioni dell'edificio in calcestruzzo, durante la fase di costruzione siano superiori a quelle degli edifici con struttura in legno, a lungo termine l'impronta di carbonio della casa in CLT risulta la più alta in valore, soprattutto se si tiene conto della capacità di ricarbonatazione del calcestruzzo nel tempo.

MACBA museo - Barcelona



La **gestione** sostenibile delle **foreste**

Una valutazione specifica del processo di gestione della foresta è indispensabile inoltre dal momento in cui le differenze nelle pratiche forestali tra regioni o produttori potrebbero essere significative, se confrontate individualmente, ma azzerate, se valutate attraverso un dato medio [34], ad esempio estrapolato da una EPD media di settore.

È di fondamentale importanza poi sottolineare come, ad oggi, numerosi metodi di valutazione della CO₂ biogenica trascurino, ad esempio, le emissioni correlate ai residui della raccolta e lavorazione del legno che possono portare anche ad un raddoppio degli impatti sull'indicatore GWP nella fase A1-A5 (*produzione, trasporto e costruzione*) del ciclo di vita dell'edificio [32].

La crescita della materia prima a base biologica funzionale ai prodotti da costruzione (oltre a creare competizione con la produzione alimentare e altri usi del suolo) richiede poi l'impiego di fertilizzanti e combustibili fossili che devono essere valutati nella costruzione dell'inventario LCI.

Non devono poi essere trascurate neppure le altre potenziali fonti di emissioni di gas serra legate alla produzione di legno: i combustibili fossili che vengono impiegati nelle operazioni di diradamento e raccolta e le emissioni di GHG che aumentano man mano che la gestione delle foreste diventa più intensiva; l'uso del fuoco come strumento di gestione forestale che rilascia metano e protossido di azoto; la produzione di erbicidi, pesticidi e fertilizzanti che richiede energia (con relative emissioni di gas serra a monte); l'uso di fertilizzante contenente azoto che può rilasciare ossido di azoto. Non ultimi, i trasporti (dalla foresta allo stabilimento di produzione e quindi al cantiere) i quali, e soprattutto quelli su gomma [36], sono responsabili di volumi anche significativi di emissioni di CO₂ in caso di lunghe distanze. Ciò a differenza delle materie prime, in particolare argilla e calcare, e dei materiali tradizionali che, soprattutto in Italia, sono disponibili localmente, con cave e siti di produzione diffusamente distribuiti sul territorio nazionale e collocati generalmente a distanza marginale dal sito di destinazione/utilizzo.

Il legname impiegato in Italia viene importato per l'85% e secondo i dati del RAF_Italia_2019 [38], l'Italia risulta il paese dell'UE con il più basso grado di autosufficienza nell'approvvigionamento di materia prima legnosa classificandosi come importatore netto di prodotti forestali a

causa sia del basso tasso di utilizzazione delle risorse forestali nazionali, sia al limitato valore qualitativo del prodotto della selvicoltura nazionale. L'incidenza della fase di trasporto sugli impatti ambientali dei materiali isolanti *bio-based* è stata rilevata anche da Sierra-Peréz in [52]. Inoltre, se a breve termine l'uso del legno dovesse aumentare notevolmente rispetto al livello attuale, i pozzi di assorbimento di carbonio e lo stock di carbonio delle foreste potrebbero diminuire a tal punto da rendere necessario ridurre le emissioni in altri settori in cui le riduzioni delle emissioni comportano investimenti economici e sociali di maggiore portata.

Con la riduzione degli assorbimenti netti, c'è il rischio che l'obiettivo EU di neutralità del carbonio non venga raggiunto.

I risultati della ricerca finlandese, che combina quantitativamente gli impatti della raccolta del legno impiegato nella costruzione con l'impronta carbonica dell'edificio (calcolata secondo gli standard LCA), dimostrano chiaramente che, nel lungo periodo, l'impronta di carbonio totale di un edificio in legno può arrivare a superare l'impronta di un edificio realizzato con materiali convenzionali (es. calcestruzzo, laterizio).

Su questa stessa linea, con l'obiettivo di delineare esaustivamente il contributo della produzione globale di legno e lavorazione del legno e derivati alla mitigazione dei cambiamenti climatici, con anticipo sulle più recenti ricerche, la FAO ha commissionato uno studio [37] volto a stimare le emissioni totali di gas serra dalla catena del valore dei prodotti forestali: l'analisi valuta in 890 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente all'anno, le emissioni complessive della filiera, senza considerare il sequestro di carbonio associato alla crescita della biomassa. Di questi:

- il 33% proviene da impianti di produzione
- il 22% è associato all'elettricità acquistata
- il 10% è legato alla produzione di materie prime non fibrose
- il 2% è legato alla produzione di legno
- il 6% è legato ai trasporti
- il 27% è associato con la fine della vita del prodotto, quasi interamente emissioni di metano provenienti dalle discariche di smaltimento dei rifiuti legnosi.

La catena del valore dei prodotti forestali è ovviamente responsabile di un ingente sequestro di CO₂ dall'atmosfera, stoccato nella biomassa, nei prodotti finiti e nei rifiuti in discarica. Il sequestro netto di CO₂ dall'atmo-

sfera nella catena del valore dell'industria dei prodotti forestali, nel 2007, è stato di 424 milioni di tonnellate di CO₂eq, sufficienti a compensare l'86% delle emissioni di gas serra associate alla produzione di prodotti forestali e quasi la metà delle emissioni totali della catena del valore.

Considerando il sequestro di carbonio, quindi, le emissioni nette di gas serra dalla catena del valore dei prodotti forestali ammontano a 467 milioni di tonnellate di CO₂eq. all'anno, ben lungi quindi da quella ipotetica carbon neutrality, ipotizzata da approcci poco conservativi.

Gli **indicatori** di **impatto** descrittori della sostenibilità nelle **costruzioni**

Infine, occorre sottolineare come il concetto di sostenibilità che sostiene a tutte le politiche EU, inclusa la *Circular Economy e Renovation Wave*, non sia descritto esaustivamente dai soli indicatori relativi al consumo di energia primaria e di emissioni GHG. Gli standard EN 15804 e EN 15987, in accordo a quanto contenuto nel Technical Report del Joint Research Center (JCR) *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings* [47] e indicato in *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* [48] che definisce le linee guida per le buone pratiche per le valutazioni di impatto nel ciclo di vita in Europa, hanno introdotto infatti, per una completa e accurata valutazione dell'impatto ambientale di materiali ed edifici, 13 indicatori quadro, 6 indicatori addizionali, 10 indicatori descrittori dell'uso di risorse, 5 indicatori descrittori dei sequestri e delle emissioni di carbonio biogenico, 3 informazioni ambientali descrittive delle categorie di rifiuto, 4 informazioni descrittive dei flussi in uscita, 2 informazioni sul contenuto di carbonio biogenico.

In questa prospettiva, è condivisa dalla comunità scientifica l'opinione che i materiali edilizi biologici, ossia derivati da biomassa, non sempre costituiscano la scelta ottimale in termini di impatto ambientale globale dell'edificio.

Weiss, M. et al in [51] riassume alcuni degli aspetti più dibattuti tutt'oggi in ambito scientifico sulla sostenibilità ambientale dei materiali isolanti naturali e fin qui già evidenziati dagli studi citati:

- i materiali *bio-based* presentano impatti ambientali più bassi rispetto ai materiali convenzionali per la categoria del cambiamento climatico, a patto che le emissioni GHG derivanti dall'uso indiretto del suolo siano trascurate
- i materiali *bio-based* generalmente presentano impatti ambientali maggiori rispetto ai materiali convenzionali per le categorie Eutrofizzazione (EP) ed Esaurimento dell'ozono Stratosferico (ODP)
- una analisi quantitativa completa degli impatti ambientali legati all'uso nel ciclo di vita dei materiali *bio-based* deve includere gli impatti correlati all'uso del suolo (quali ad esempio gli effetti sulla biodiversità, la sostanza organica nel terreno, l'erosione dei suoli), così come i rischi collegati all'eco-tossicità e all'utilizzo potenziale di sementi e microrganismi modificati geneticamente
- la coltivazione di biomassa con pratiche convenzionali, caratterizzata dall'impiego di fertilizzanti minerali, costituisce il contributo primario all'alto valore degli indicatori EP e ODP dei materiali *bio-based*. Questi impatti possono essere ridotti migliorando la gestione dei processi di fertilizzazione e utilizzando pratiche di coltivazione estensiva. Deve però essere tenuto conto che questo può comportare una riduzione della resa/ettaro e un conseguente incremento della richiesta di suolo per la produzione di biomassa
- il valore calcolato delle emissioni di GHG evitate grazie all'impiego di materiali *bio-based* in sostituzione di materiali convenzionali, è soggetto ad incertezza poiché, per quanto emerge dalla letteratura scientifica, le emissioni di N₂O legate alla coltivazione di biomassa vengono per lo più trascurate, così come gli effetti degli usi indiretti del suolo in relazione agli scenari di produzione e all'orizzonte temporale di studio, ed in particolare quest'ultimo, i presunti risparmi nelle emissioni di GHG possono ridursi considerevolmente.

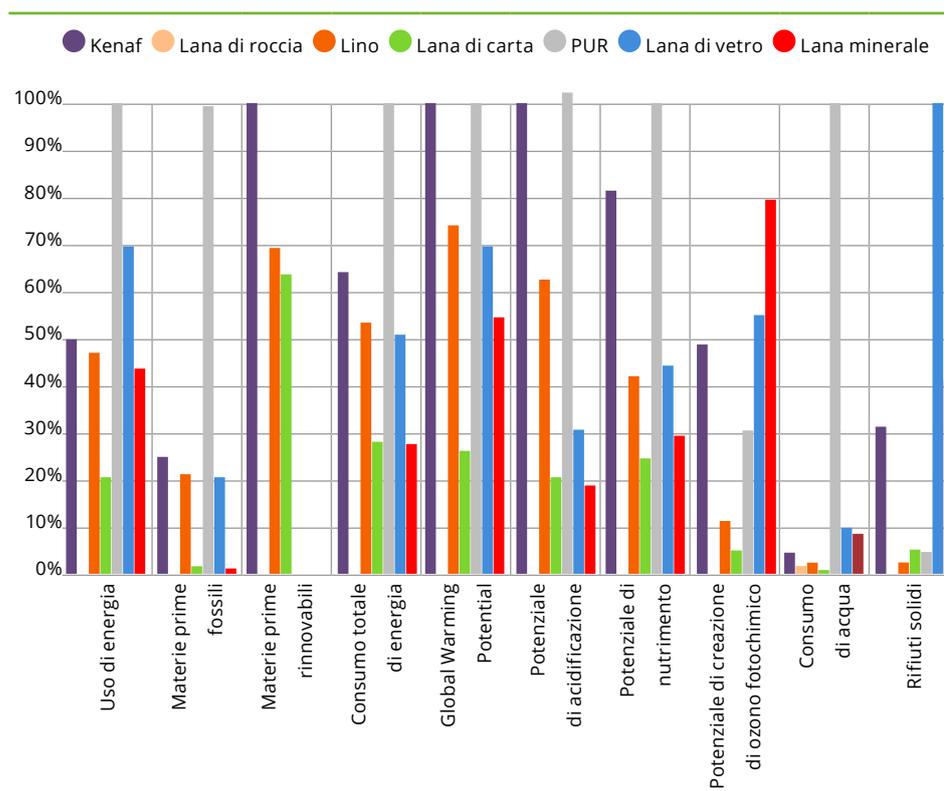
A risoluzioni analoghe, pur limitando il confronto alla sola fase di produzione, giunge anche Dovjak, M. et al in [54] concludendo, in un confronto tra 15 materiali isolanti, suddivisi in tre macro categorie (isolanti inorganici-sintetici, isolanti organici-sintetici, isolanti organici-naturali) come gli isolanti organici-naturali offrano prestazioni migliori solo in alcune delle categorie di impatto, mentre in altre, mostrano una prestazione ambientale inferiore alle attese.

Cusenza, M.A. et al. in [46], nell'obiettivo di valutare gli impatti ambientali di diverse soluzioni a confronto per la riqualificazione energetica di un edificio residenziale in Italia, rileva come l'impiego di isolanti in cellulosa, possa comportare un impatto maggiore in termini di consumo di risorse,

in confronto, ad esempio alla lana di roccia, a causa della presenza di acido borico (prodotto a partire dal borato, una delle sostanze inserite nella lista EU 2020 delle materie prime critiche).

Ardente, F. in [49] ha condotto un confronto (Figura 17) tra diversi materiali isolanti (lana di roccia, cellulosa, poliuretano, lana di vetro, fibre di lino), a parità di resistenza termica (FU), nell'ottica di valutare gli impatti ambientali legati all'utilizzo di isolanti in fibra di kenaf. Lo studio ha rilevato come:

- ai pannelli in fibra di kenaf sia associato un consumo relativamente alto di energia (59.4 MJ) derivante per il 40% dal *feedstock* di energia rinnovabile (contenuto energetico delle fibre vegetali). Parte di questa energia può essere recuperata al termine della vita utile se lo scenario di smaltimento prevede l'incenerimento con recupero energetico
- la produzione dei pannelli in kenaf comporta un alto impatto ambientale legato all'indicatore GWP, calcolato con l'approccio 0/0 e considerando i residui vegetali della raccolta, in uno scenario cautelativo, quali rifiuti di processo.



ANALISI DI IMPATTO COMPARAZIONE DI VARI MATERIALI ISOLANTI

Figura 17
risultati a confronto degli impatti ambientali di materiali isolanti a parità di resistenza termica

Di Giuseppe, E. et al in [55], nell'ambito del progetto EU *RIBuild* per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici storici attraverso l'utilizzo di sistemi di isolamento interno, ha confrontato la prestazione ambientale nelle fasi del ciclo di vita di produzione (moduli A1-A3), Uso (B6 consumo di energia in uso) e Fine Vita (moduli C1-C4), di 5 diverse soluzioni conformi (Expanded Polystyrene - EPS, Calcium Silicate - CaSi, Autoclaved Aerated Concrete - AAC, Cork, e Rockwool - RW) attraverso la interpretazione dei dati contenuti in EPD o l'analisi condotta a partire dal database Ecoinvent che evidenzia come, quando la valutazione sia condotta a scala di componente, i benefici derivanti dall'impiego di materiali *bio-based* possano non essere sufficienti a garantire una prestazione ottimale del componente.

Schulte, M. in [50], indaga anche gli aspetti di sostenibilità economica dell'utilizzo di materiali *bio-based* rilevando, in un confronto a parità di prestazione termica tra diversi materiali isolanti (fibra di legno, fibra di canapa, lino, miscanto, EPS, lana di roccia), le medesime criticità dei materiali *bio-based* su alcuni indicatori di impatto quali *freshwater eutrophication, human noncarcinogenic toxicity, land use, marine eutrophication, ozone formation, human health, ozone formation, terrestrial ecosystems, stratospheric ozone depletion* e un deciso incremento del costo economico nel ciclo di vita legato all'utilizzo di materiali *bio-based*. Considerando nella analisi, la produzione (inclusa la coltivazione) della materia prima, i costi di trasporto, di messa in opera e di smaltimento, i materiali *bio-based* di più larga diffusione ed utilizzo nel mercato edilizio italiano comportano una spesa economica superiore (Figura 18) a quella necessaria per l'utilizzo, a parità di prestazione, di materiali di origine sintetica/minerale.

Figura 18
costo economico
nel ciclo di vita
dei materiali isolanti
per FU (Functional Unit)

Fase del ciclo di vita	Costi in € per FU (Functional Unit)					
	Fibra di legno	Fibra di canapa	Lino	Miscanto	EPS	Lana di roccia
Coltivazione del sistema	1.51	2.21	2.79	0.90	0	0
Produzione del sistema	10.33	9.19	6.35	2.76	4.13	8.35
Fase di utilizzo del sistema	0.81	3.70	0.81	3.74	3.70	3.64
Fine vita del sistema	1.22	1.31	1.37	1.39	0.46	0.81
Trasporti	0.37	0.39	0.40	0.41	0.09	0.25
Totale	14.24	16.79	11.72	9.18	8.39	13.05

Sierra-Peréz in [52], in uno studio focalizzato sulla analisi degli impatti ambientali legati alla produzione dei pannelli isolanti in sughero, evidenzia impatti maggiori rispetto al resto dei materiali isolanti più comuni per la maggior parte delle categorie di impatto. Sottolinea inoltre come, nonostante l'inclusione del carbonio biogenico nella valutazione ambientale dei materiali da costruzione di origine forestale migliori considerevolmente i risultati del GWP, è tuttavia discriminante il metodo adottato per il calcolo del carbonio biogenico e lo scenario di fine vita ipotizzato per la valutazione.

Conclude quindi affermando che l'uso di materiali isolanti *bio-based* non implica necessariamente una riduzione degli impatti ambientali.



Complesso residenziale Novetredici, Milano - Cino Zucchi Architetti @FilippoPoli (pubblicato su CIL163)



Ca' delle Alzaie, Treviso - Stefano Boeri Architetti @AndreaPertoldeo (pubblicato su CiL187)

Conclusioni

L'analisi della più recente bibliografia scientifica ha posto l'accento su alcune questioni di estrema rilevanza nell'ambito della pianificazione e programmazione strategica del PNRR.

In primis la necessità di adottare una metodologia di analisi univoca e gli sforzi dell'industria edilizia europea, di concerto con i Ministeri, su preciso mandato della EU, hanno portato, in quest'ottica, allo sviluppo di una serie di standard (sviluppati dalla commissione tecnica CEN TC350) per la progettazione, misurazione e verifica della sostenibilità dei prodotti edilizi (materiali ed edifici) che ha trovato piena attuazione in programmi di promozione, controllo e certificazione e della edilizia sostenibile in numerosi stati membri.

Allo stesso tempo, gli studi hanno posto l'attenzione sulla **necessità di condurre analisi sull'intero ciclo di vita del prodotto edilizio** poiché gli impatti associati al fine-vita del prodotto sono fortemente condizionati dalla definizione dello scenario di analisi, dai condizionamenti tecnologici locali e possono invertire il valore degli indicatori calcolato nella fase di produzione, portando, se trascurati o non correttamente valutati, ad errori sostanziali.

Per contro, mentre a scala generale, si è arrivati ad una armonizzazione del metodo impiegato per le valutazioni LCA dell'edificio, nel caso della valutazione di aspetti ambientali di materiali specifici, quali appunto i processi di sequestro di carbonio, la letteratura ancora riporta approcci tra loro estremamente contrastanti, i cui risultati sono difficilmente confrontabili. Ciò sottolinea **l'ingerenza delle diverse metodologie utilizzate per la valutazione degli impatti ambientali legati ai processi di sequestro/emissione di CO₂ sulla qualità e attendibilità dei risultati dell'LCA per l'indicatore GWP**, evidenziando il rischio di risultati incompleti e/o potenzialmente fuorvianti se utilizzati nei processi decisionali, rendendo di fatto labile ogni affermazione categorica sull'effettivo contributo offerto dai prodotti edilizi *bio-based* al raggiungimento degli obiettivi di *carbon neutrality*.

A sostegno di questa affermazione, l'analisi della bibliografia ha inoltre

evidenziato le attuali incertezze legate alla **gestione della filiera legno** e nello specifico delle emissioni correlate ai residui della raccolta e lavorazione del legno e delle altre potenziali fonti di emissioni di gas serra legate alla produzione di legno, quali in prima istanza quelle relative ai **trasporti**, che possono portare anche ad un raddoppio degli impatti sull'indicatore GWP.

Tutto ciò premesso, **può risultare fuorviante ogni indicazione generica verso l'utilizzo di materiali specifici** senza che i benefici di tale utilizzo siano puntualmente verificati attraverso una valutazione condotta con metodologie armonizzate, per scenari tecnologici ed economici concreti. In conclusione, citando Hart, J., [39] non sussistono valide e unanimemente condivise ragioni scientifiche per sostenere che il legno rappresenti una soluzione aprioristicamente valida per far uscire l'ambiente costruito dalla attuale crisi climatica: le domande senza risposta sono molte e le questioni della disponibilità globale e della deforestazione mettono in dubbio quanto il legno possa costituire una soluzione al problema ben più grande di dare alloggio ad una popolazione urbana in aumento in tutto il mondo [40].

Bibliografia

- [1] Comunicazione Della Commissione Al Parlamento Europeo, Al Consiglio, Al Comitato Economico E Sociale Europeo E Al Comitato Delle Regioni "Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: investire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita", 14.10.2020 COM(2020)
- [2] Towards a high-quality Baukultur for Europe, Davos Declaration 2018
- [3] Kurkinen, E. et al. Energy and climate-efficient construction systems: Environmental assessment of various frame options for buildings in Brf. Viva, 2018 pag 41, SP Rapport, ISSN 0284-5172 ; 2015:70 E
- [4] Estanqueiro, B., et al.. (2018). Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(4), 429–449
- [5] Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408–416
- [6] Govindan, K., et. Al (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66–83
- [7] Göswein V. et al. (2019) Using anticipatory life cycle assessment to enable future sustainable construction, *Journal of Industrial Ecology*; 1–15.
- [8] PrEN 15978-1:202x Sustainability of construction works - Methodology for the assessment of buildings - Part 1: Environmental Performance
- [9] EN15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products
- [10] nZEB Demo buildings environmental impact through LCA, Ref. Ares(2019)6267803 - 10/10/2019
- [11] Blengini GA, Di Carlo T., The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy Build* 2010;42:869e80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>

- [12] Emami N., et al. A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database-Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies, *Buildings* 2019, 9, 20; doi:10.3390/buildings9010020
- [13] Gardner, H.M., Whole Building Life Cycle Assessment of a Living Building, *J. Archit. Eng.*, 2020, 26(4): 04020039
- [14] Berggren, B., M. Hall, and M. Wall. 2013. "LCE analysis of buildings—Taking the step towards net zero energy buildings." *Energy Build.* 62: 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.063>
- [15] Thormark, C. 2002. "A low energy building in a life cycle—Its embodied energy, energy need for operation and recycling potential." *Build. Environ.* 37 (4): 429–435. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
- [16] Pomponi, F. De Wolf, C., Moncaster, A., *Embodied Carbon in Buildings - Measurement, Management, and Mitigation*, Springer, Cham, 2018
- [17] Davies D., Johnson L., Doepker B., Hedlund M. (2018) Quantifying Environmental Impacts of Structural Material Choices Using Life Cycle Assessment: A Case Study. In: Pomponi F., De Wolf C., Moncaster A. (eds) *Embodied Carbon in Buildings*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7_6
- [18] Passer, A., Schuler, D., & Maydl, P. (2007). Life Cycle Assessment of buildings comparing structural steelwork with other construction techniques, Poster session presented at 3rd International Conference on Life Cycle Management, University of Zurich at Irchel
- [19] Shahana Y. Janjua et al., Review of Residential Buildings' Sustainability Performance Using a Life Cycle Assessment Approach, *J Sustain Res.* 2019;1:e190006. <https://doi.org/10.20900/jsr20190006>
- [20] Göswein V, Goncalves AB, Silvestre JD, Freire F, Kurda R. Transportation matters—does it? GIS-based comparative environmental assessment of concrete mixes with cement, fly ash, natural and recycled aggregates. *Resour Conserv Recycl.* 2018;137:1-10
- [21] Nath P, Sarker PK, Biswas WK. Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment. *Energy Build.* 2018;158:1694-702
- [22] Lawania K, Sarker PK, Biswas WK. Global Warming Implications of the Use of By-Products and Recycled Materials in Western Australia's Housing Sector. *Materials.* 2015;8(10):6909-25
- [23] Zeitz A., Griffin C.T., P. Dusicka P., Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. *Energy and Buildings*, 2019, 199, 126-133
- [24] Robertson, A. B., Lam, F. C., & Cole, R. J. (2012). A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid- Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings*, 2(3), 245- 270. <https://doi.org/10.3390/buildings2030245>

- [25] Bamber, N., Turner, I., Arulnathan, V. et al. Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: review of current practice and recommendations. *Int J Life Cycle Assess* 25, 168–180 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01663-1>
- [26] Hammond, G. P., and C. I. Jones. 2008. "Embodied energy and carbon in construction materials." *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy* 161 (2): 87–98
- [27] Fouquet, M., A. Levasseur, M. Margni, A. Lebert, S. Lasvaux, B. Souyri, C. Buhé, and M. Woloszyn. 2015. "Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment." *Build. Environ.* 90: 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022>
- [28] Levasseur, A., P. Lesage, M. Margni, and R. Samson. 2013. "Biogenic carbon and temporary storage addressed with dynamic life cycle assessment." *J. Ind. Ecol.* 17 (1): 117–128. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x>
- [29] McKechnie, J., S. Colombo, J. Chen, W. Mabee, and H. L. MacLean. 2011. "Forest bio-energy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels." *Environ. Sci. Technol.* 45 (2): 789–795. <https://doi.org/10.1021/es1024004>
- [30] Simonen, K. 2014. *Life cycle assessment*. Abingdon, UK: Routledge
- [31] Peuportier B, Herfray G, Malmqvist T, Zabalza I, Staller H, Tritthart W, et al. Life cycle assessment methodologies in the construction sector: the contribution of the european lore-lca project. In: *Sustain. Build. Conf. Helsinki*; 2011. p. 21. [http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigopub/0767/\\$FILE/cp0767.pdf](http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigopub/0767/$FILE/cp0767.pdf) [accessed 16.06.14]
- [32] Hoxha, E., et al. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, 1(1), pp. 504–524. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.46>
- [33] Erb, K. H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., & Pongratz, J. (2018). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553(7686), 73–76. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- [34] Sierra Club. 2018. *Open letter: Climate-smart cross-laminated timber: Mass timber buildings and forest stewardship*. San Francisco: Sierra Club
- [35] Vogtländer, J. G., van der Velden, N. M., & van der Lugt, P. (2014). Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; cases on wood and on bamboo. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 13–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0629-6>
- [36] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>
- [37] Miner R., *Impact of the Global Forest Industry on Atmospheric Greenhouse Gasses*, Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *FAO Forestry Papers*, 2010

- [38] RaFITALIA 2017-2018, Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia, MIPAAFFT, Compagnia delle Foreste S.r.l., 2019
- [39] Hart, J, D'Amico, B, & Pomponi, F. Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures. *J Ind Ecol.* 2021; 25: 403– 418. <https://doi.org/10.1111/jiec.13139>
- [40] Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J. H., & D'Amico, B. (2020). Buildings as a global carbon sink ? A reality check on feasibility limits. *One Earth*, 3(2), 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018>
- [41] Breton, C.; Blanchet, P.; Amor, B.; Beauregard, R.; Chang, W.-S. Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches. *Sustainability* 2018, 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/su10062020>
- [42] Levasseur, A.; Lesage, P.; Margni, M.; Deschênes, L.; Samson, R. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, 3169–3174
- [43] Favero, Alice & Mendelsohn, Robert & Sohngen, Brent. (2018). Can the Global Forest Sector Survive 11 °C Warming?. *Agricultural and Resource Economics Review.* 47. 388-413. [10.1017/age.2018.15](https://doi.org/10.1017/age.2018.15)
- [44] Steel, A., Carbon Storage and Climate Change Mitigation Potential of Harvested Wood Products, 61st Session of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries, April 2020
- [45] Mendoza Beltran, Angelica & Pomponi, Francesco & Guinée, Jeroen & Heijungs, Reinout. (2018). Uncertainty Analysis in Embodied Carbon Assessments: What Are the Implications of Its Omission?. [10.1007/978-3-319-72796-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7_1)
- [46] Cusenza, M.A.; Gulotta, T.M.; Mistretta, M.; Cellura, M. Life Cycle Energy and Environmental Assessment of the Thermal Insulation Improvement in Residential Buildings. *Energies* 2021, 14, 3452. <https://doi.org/10.3390/en14123452>
- [47] Gervasio, H. & Dimova, S., Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings - EFIResources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design, 2018
- [48] International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors, EUR 24571EN – 2011, European Commission, JRC, Institute for Environment and Sustainability, 2011
- [49] Ardente, Fulvio & Beccali, Marco & Cellura, Maurizio & Mistretta, Marina. (2008). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings.* 40. 1-10. [10.1016/j.enbuild.2006.12.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.009)
- [50] Schulte, Maximilian & Lewandowski, Iris & Pude, Ralf & Wagner, Moritz. (2021). Comparative Life Cycle Assessment of Bio-Based Insulation Materials: Environmental and Economic Performances. *GCB Bioenergy.* [10.1111/gcbb.12825](https://doi.org/10.1111/gcbb.12825)

- [51] Weiss, M., Haufe, J., Carus, M., Brandão, M., Bringezu, S., Hermann, B. and Patel, M.K. (2012), A Review of the Environmental Impacts of Biobased Materials. *Journal of Industrial Ecology*, 16: S169-S181. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00468.x>
- [52] Sierra-Pérez, Jorge & Boschmonart-Rives, Jesús & Dias, Ana & Gabarrell Durany, Xavier. (2016). Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*. 126. 10.1016/j.jclepro.2016.02.146
- [53] Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides, Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review, *Sustainable Cities and Society*, Volume 35, 2017, Pages 280-288
- [54] Dovjak, Mateja & Košir, Mitja & Pajek, Luka & Iglič, Nataša & Bozicek, David & Kunič, R.. (2017). Environmental impact of thermal insulations: How do natural insulation products differ from synthetic ones?. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 92. 012009. 10.1088/1755-1315/92/1/012009
- [55] Sanchez Mayoral Gutierrez, M., Solution sets for the Cost reduction of new Nearly Zero-Energy Buildings – Life cycle assessment of typical multi-family houses with different energy performance levels, CoNZEBS EU H2020-EE-2016-C-SA Projekt ID: 754046, Deliverable D7.1
- [56] Rüter S. et al., *ClimWood2030. Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvest wood products: Perspective 2030. Final Report*, Hamburg 2016, Thünen Report 42 des Thünen Institute of Wood Research
- [57] *Protect and restore: How forests can help the EU tackle climate change*, Moreton in Marsh/Brüssel, o. J., Fern office
- [58] Holzer, P., Hammer R., *Analyse aktueller Studien der Forstwirtschaft. Systematisch vergleichende Analyse vier aktueller wissenschaftlicher Publikationen zur Umweltrelevanz österr. Holzproduktion undnutzung*, Institute of Building Research & Innovation, Wien 2016
- [59] Palacios Muñoz, Beatriz & Peuportier, Bruno & Gracia, Luis & López-Mesa, Belinda. (2019). Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach. *Building and Environment*. 160. 106203. 10.1016/j.buildenv.2019.106203

Redazione terminata nel febbraio 2022

