

EDIFICI ALTI CON STRUTTURE IBRIDE LEGNO-ACCIAIO

una valutazione comparativa mediante analisi LCA

Giovanni Perrucci - Dipartimento di Culture del Progetto, Università Iuav di Venezia

Introduzione

Il settore delle costruzioni ha un forte impatto ambientale, con gli edifici responsabili fino al 35% delle emissioni di CO₂ e al 40% del consumo energetico (EEA, 2024). La crescita demografica ha aumentato la domanda di nuovi edifici, spesso portando a urbanizzazione incontrollata e consumo eccessivo di suolo. Per contrastare questi effetti, lo sviluppo verticale sta diventando una soluzione chiave, permettendo di ottimizzare lo spazio, ridurre l'occupazione di suolo e preservare le aree naturali. Inoltre, una maggiore densità abitativa favorisce infrastrutture più efficienti e riduce le distanze tra lavoro, residenza e luoghi di svago.

Tuttavia, una crescita in altezza richiede un'attenta pianificazione per garantire che gli edifici siano sostenibili dal punto di vista ambientale. In particolare, gli edifici alti sono considerati delle carbon spikes (Helal et al., 2020), poiché la loro costruzione tradizionalmente comporta un elevato impiego di materiali ad alta intensità di emissioni di CO₂, come il calcestruzzo e l'acciaio.

L'impatto ambientale di queste strutture è determinato non solo dai processi di produzione ma anche dalla quantità di materiali utilizzati e dal loro trasporto, che contribuiscono significativamente all'impronta di carbonio complessiva. L'aumento dell'altezza comporta, infatti, un incremento esponenziale delle esigenze strutturali, influenzando la scelta dei materiali e le soluzioni ingegneristiche adottate.

I grattacieli moderni sono tradizionalmente costruiti con strutture composite in calcestruzzo armato e acciaio, scelti per resistenza e durabilità. Il calcestruzzo armato è usato per nuclei e fondazioni, mentre l'acciaio, più leggero e duttile, è impiegato negli aggetti e, più raramente, nei telai. L'innovazione tecnologica favorisce la sostenibilità con calcestruzzi a basse emissioni, acciai riciclati e costruzioni modulari o prefabbricate, riducendo l'impatto ambientale.

Sebbene l'innovazione tecnologica si concentri principalmente sull'ottimizzazione dei materiali tradizionali, anche il legno lamellare, tradizionalmente utilizzato per la costruzione di edifici di bassa e media altezza, sta prendendo piede nella realizzazione di edifici alti, grazie alle sue proprietà strutturali e alla sua sostenibilità. L'impiego di legno lamellare ingegnerizzato, come il Cross-Laminated Timber (CLT) o il Glued Laminated Timber (GLT o Glulam), permette di ridurre le emissioni di CO₂ incorporate. Il legno, infatti, non solo richiede una minor quantità di energia - ed emissioni - nella fase di produzione, ma inoltre agisce come un serbatoio di carbonio, immagazzinando CO₂ durante la crescita degli alberi.

Il crescente impiego del legno lamellare nelle costruzioni non è dovuto solo a vantaggi attinenti alla sua sostenibilità, ma anche alla sua leggerezza e all'elevato potenziale di prefabbricazione, che semplificano la gestione del cantiere e accelerano i tempi di costruzione, riducendo i carichi sulle fondazioni e l'impatto ambientale complessivo. L'acciaio offre vantaggi simili, ma richiede un elevato consumo di materie prime, mentre il calcestruzzo ha una produzione ad alta intensità energetica e una prefabbricazione meno efficiente.

Dal punto di vista meccanico, il legno lamellare (GLT e CLT) ha una resistenza alla compressione paragonabile o superiore al calcestruzzo non armato e un rapporto peso-resistenza favorevole rispetto all'acciaio. Tuttavia, la sua leggerezza e flessibilità ne limitano l'uso negli edifici alti, dove sono richieste particolari resistenze ai carichi laterali. Negli ultimi anni, quindi, l'adozione di strutture ibride legno-calcestruzzo e legno-acciaio, che combinano i vantaggi dei diversi materiali mantenendo l'efficienza della prefabbricazione, si è affermata come alternativa possibile ai materiali tradizionali.



Figura 1. a) Una vista dell'Ascent Tower (Michael Barera, via Wikimedia Commons); b) una vista del Mjøstårnet (Nina Rundsveen, via Wikimedia Commons)

Tra gli esempi più significativi si distingue l'Ascent Tower negli Stati Uniti (fig. 1a), attualmente il più alto edificio in legno al mondo, con i suoi 86,6 metri di altezza. Questo grattacielo, situato a Milwaukee, è costruito attorno ad un nucleo e poggia su un basamento alto 7 piani, destinato a parcheggi, entrambi realizzati in calcestruzzo armato. La struttura principale in elevazione, che ospita 19 piani destinati a residenze, è realizzata in legno lamellare ed è composta da pilastri e travi in GLT, su cui poggiano solai in CLT.

Il Mjøstårnet, situato a Brumunddal in Norvegia (fig. 1b), con i suoi 85,4 metri si distingue per essere interamente costruito con legname di origine locale. La struttura, che comprende 18 piani residenziali, è un telaio interamente composto da pilastri e travi in GLT, con solai in calcestruzzo armato tra il dodicesimo e il diciottesimo piano, progettati per conferire rigidità torsionale alla struttura. Il CLT è invece impiegato per la costruzione della tromba delle scale, del pozzo dell'ascensore e dei balconi.



Figura 2. L'edificio del Sara Kulturhus e una vista dell'auditorium (Skelleftea Kommun, via unsplash.com)

Tra gli esempi più significativi rientra il Sara Kulturhus in Svezia (fig. 2), un complesso che include diversi edifici, tra cui spicca un parallelepipedo di 75 metri di altezza. L'unico elemento in cui l'acciaio è integrato nella struttura è una trave reticolare mista GLT-acciaio, collocata al quinto piano per sostenere un auditorium e sorreggere i livelli superiori. I restanti 15 piani sono realizzati interamente con

pannelli in CLT, ricavati da foreste locali gestite in modo sostenibile, impiegati sia per la struttura portante verticale sia per i solai.

Questo articolo riporta i risultati di uno studio condotto analizzando in modo sistematico diverse soluzioni strutturali ibride acciaio-legno. L'obiettivo dello studio è comprendere al meglio da un punto di vista ambientale la

combinazione di legno e acciaio come elementi strutturali per gli edifici alti. Avvalendosi di un software di Building Information Modeling (BIM) e di un tool per il calcolo del Life Cycle Assessment (LCA), la ricerca ha esaminato vari gradi di integrazione tra elementi strutturali in legno e acciaio, valutandone le implicazioni in termini di impatto ambientale. Le analisi sono state condotte in termini di Potenziale di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential, GWP), parametro che misura l'impatto delle emissioni di gas serra (CO_2 e CH_4 tra le altre), espresso in kgCO_2eq . Utilizzando il GWP come parametro di valutazione, questo studio evidenzia il ruolo degli edifici nel cambiamento climatico e mira a identificare l'alternativa costruttiva che determina il minor impatto ambientale.

Metodologia

Questo articolo approfondisce l'applicazione della metodologia di valutazione del ciclo di vita (LCA)(CEN, 2011) utilizzata per analizzare l'impatto ambientale di edifici di

media e grande altezza, che combinano acciaio e legno come elementi strutturali. L'analisi confronta edifici virtualmente costruiti in due regioni: l'Europa, dove la tecnologia del legno lamellare è stata introdotta per la prima volta ed è ormai ben consolidata, e il Nord America, dove gli edifici alti rivestono una notevole importanza nella progettazione architettonica.

Processo di progettazione dello scenario e analisi dell'inventario

Dopo una prima attività di analisi dei casi studio di edifici di media e grande altezza progettati nell'ultimo decennio, sono emerse tre diverse tipologie costruttive (tutto acciaio, ibrido acciaio-legno, tutto legno). Una serie di variabili ricorrenti sono state estrapolate per la definizione di otto scenari ipotetici generici, modellati in collaborazione con un gruppo di studi di ingegneria. Tali scenari, ottenuti simulando il processo progettuale che verrebbe adottato all'interno di uno studio professionale, rappresentano soluzioni struttu-

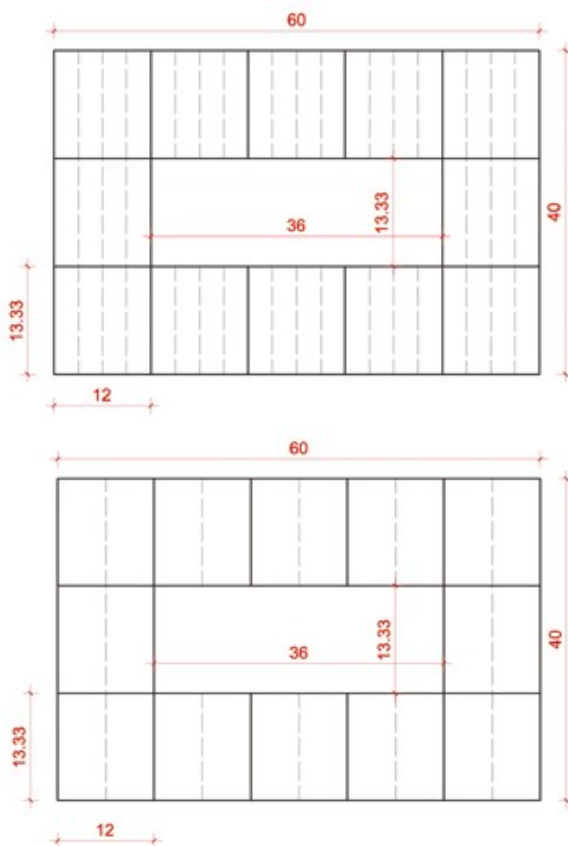


Figura 3. Pianta strutturali: a) scenari 1 e 2; b) scenari 3 e 4 (misure in metri).

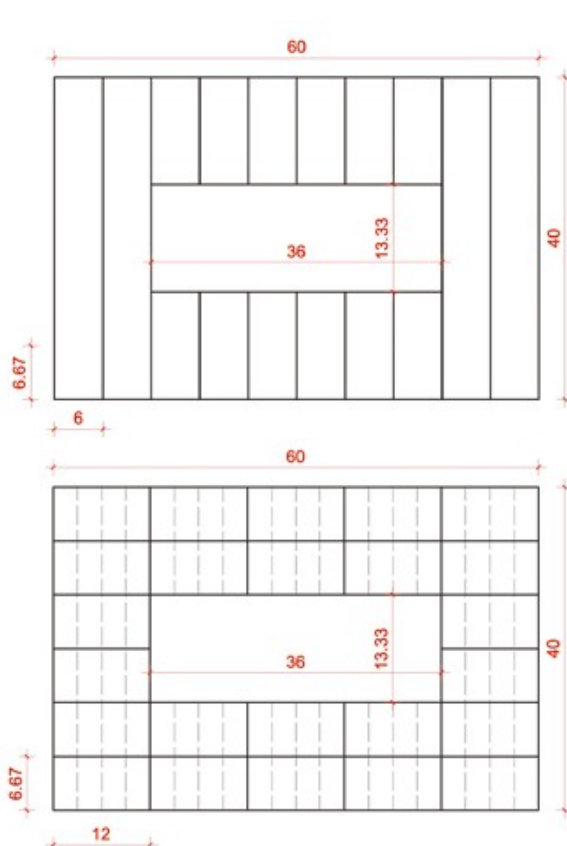


Figura 4. Pianta strutturali: a) scenari 5 e 6; b) scenari 7 e 8 (misure in metri).

rali alternative. Per comprendere al meglio la casistica degli edifici a media e grande altezza utilizzando legno e acciaio, sono stati considerati quattro edifici a 40 piani e quattro edifici a 20 piani, progettati con sistemi strutturali distinti; tutti prevedono una pianta rettangolare (40 x 60 metri) e la presenza di un nucleo in calcestruzzo armato (13,33 x 36 metri) con funzione di resistenza ai carichi laterali e alloggiamento del nucleo funzionale e distributivo centrale.

In dettaglio sono state identificate tre tipologie strutturali. Le alternative con elementi strutturali realizzati interamente in acciaio e ibrido acciaio-legno sono state applicate ad entrambe le categorie di altezza; l'alternativa realizzata interamente in legno è stata invece considerata solo per la categoria a 20 piani, poiché una struttura di 40 piani interamente in legno è al momento da ritenersi non realistica. Le fondazioni sono state escluse dal calcolo a causa della loro elevata variabilità a seconda del sito di costruzione. Le caratteristiche degli scenari sono descritte nella Tabella 1. Per gli elementi strutturali in acciaio sono stati utilizzati profili della serie americana W per colonne e travi, mentre i solai sono costituiti da una lamiera grecata in acciaio (7.6 cm) e un getto collaborante in calcestruzzo alleggerito armato (8.4 cm); colonne e travi in legno sono realizzate in GLT, mentre i solai in legno sono costituiti da pannelli in CLT a 7 strati (24.5 cm) accoppiati con uno strato di calcestruzzo alleggerito armato (6.3 cm) con funzioni di irrigidimento e fonoassorbenti.

Per gli edifici in acciaio e legno lamellare è prevista una resistenza al fuoco di 2 ore, conforme all'International Building Code (IBC) e alla norma EN 1991. Gli elementi in acciaio sono rivestiti con 5 cm di intonaco spruzzato, mentre quelli in legno sono sovradimensionati per compensare la carbonizzazione superficiale. I solai hanno uno spessore adeguato per garantire la resistenza al fuoco senza protezioni aggiuntive.

Metodologia passo dopo passo

a) a partire dalle indicazioni fornite dal team di ingegneri, i diversi scenari strutturali sono stati modellati utilizzando Autodesk Revit che, grazie all'assemblaggio tridimensionale degli elementi strutturali, permette di stimare correttamente le quantità di materiale, considerando le connessioni e gli strati sovrapposti. In questa fase si ottiene un computo metrico dei materiali;

b) le quantità di materiali ottenute dal modello BIM sono state computate all'interno del software One Click LCA, che in automatico le associa al rispettivo GWP. In questa fase si ottiene l'impatto totale relativo a ciascun materiale;

c) grazie all'utilizzo del software, è possibile ottenere una valutazione dell'impatto totale e di ciascuna fase del ciclo di vita del singolo scenario e confrontarlo con le altre alternative.

Variazioni degli scenari considerati

Per ciascuno scenario sono state modellate due variazioni in aggiunta alla versione base:

a) gli scenari "base" rappresentano i risultati di impatto medio per i progetti idealmente costruiti a Parigi (alternativa europea) e New York (alternativa nordamericana). Il software One Click LCA è stato utilizzato per selezionare dati medi o derivanti da specifiche Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) per i materiali da costruzione;

b) per ciascuno scenario è stata poi valutata un'alternativa "best case" selezionando i materiali con il minor impatto possibile, laddove disponibili. Questa soluzione, mirando a ridurre al minimo l'impatto ambientale, rappresenta il caso ideale ma poco plausibile a causa dei possibili vincoli logistici e di approvvigionamento di tali materiali meno impattanti;

c) nei casi in cui gli impatti ambientali differivano significativamente tra l'alternativa europea e quella nordamericana, è

Tabella 1. Caratteristiche degli scenari

Scenari	Componenti strutturali		Piani	Dimensione campate (m)	Superficie IPMS 4.2 (metri quadri)
	ACCIAIO	LEGNO			
1	Colonne - travi - solai		20	12 x 13.33	38373
2	Colonne - travi - solai		40	12 x 13.33	76628
3	Colonne - travi	Solai	20	12 x 13.33	38373
4	Colonne - travi	Solai	40	12 x 13.33	76628
5	Colonne - travi - solai		20	6 x 6.67	38189
6	Colonne	Travi - solai	40	6 x 6.67	76675
7	Colonne - travi - solai		20	12 x 6.67	38382
8	Colonne - travi - solai		40	12 x 6.67	76687

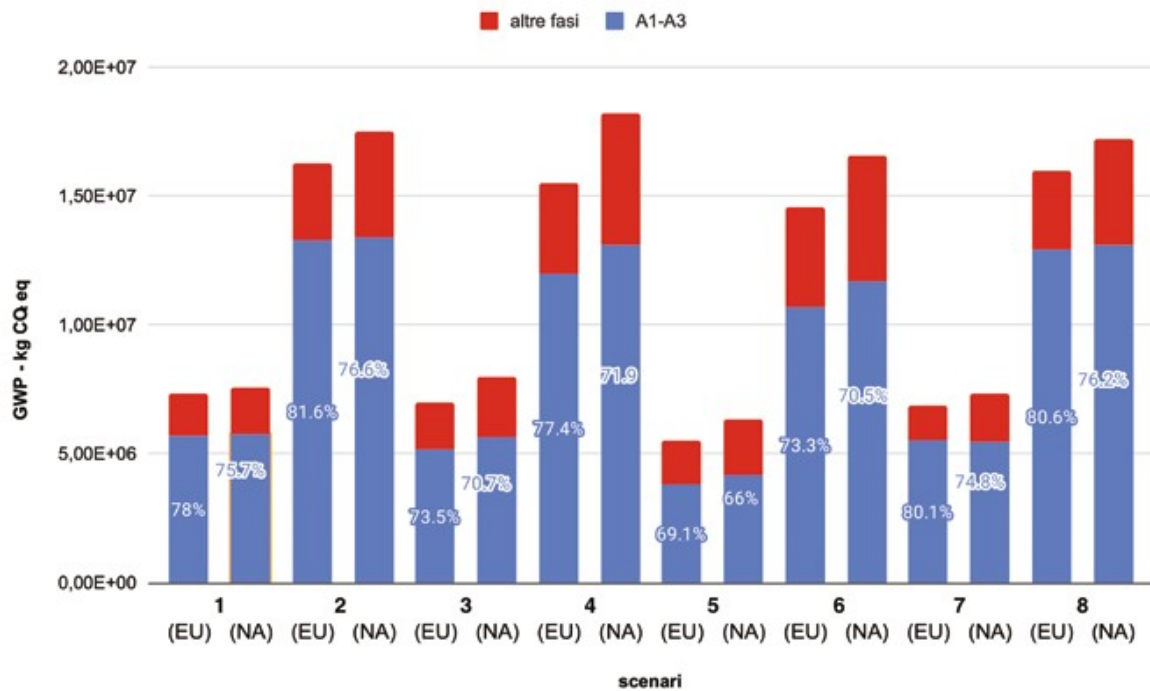


Figura 5. Influenza delle fasi A1-A3 sul ciclo di vita totale nei singoli scenari.

stato analizzato uno scenario “migliore con materiali importati”. Questa alternativa valuta l’impatto ambientale derivante dall’approvvigionamento dei materiali meno impattanti da un continente all’altro, tenendo conto degli impatti del trasporto. I mezzi di trasporto e l’efficienza del carburante sono basati sui valori predefiniti suggeriti dal software.

Risultati della valutazione LCA

Per garantire la comparabilità dei dati tra i vari scenari, gli impatti totali sono stati normalizzati rispetto alla superficie totale, calcolata secondo lo standard IPMS 4.2 (IPMSC, 2023). Tale standard considera l’area ottenuta sottraendo dalla superficie totale gli elementi strutturali, gli involucri esterni e le partizioni interne.

Elementi interessanti emergono dall’analisi dei risultati dei vari scenari, declinati nelle tre alternative.

In generale, analizzando gli impatti totali degli scenari base, la fase di produzione (A1-A3) contribuisce a quasi il 77% degli impatti totali negli scenari europei e al 73% in quelli nordamericani (fig. 5). La fase di trasporto (A4) è meno impattante per gli scenari europei, mentre è da 2,6 a 3,6 volte superiore per il Nord America. L’Europa infatti beneficia di distanze di trasporto più brevi e di mezzi di trasporto più efficienti nei consumi, grazie soprattutto a normative più rigide sugli impatti. Le discrepanze maggiori si verificano

negli scenari con legno (CLT e GLT), poiché gli elementi in legno, sebbene più leggeri, richiedono volumi maggiori per eguagliare la resistenza dell’acciaio, con conseguenti maggiori esigenze di trasporto.

Le fasi di costruzione (A5) e fine vita (C) mostrano impatti ambientali simili tra Europa e Nord America, poiché queste fasi coinvolgono processi comparabili tra i due mercati.

In entrambe le località, tra gli scenari a 20 piani lo scenario 3, caratterizzato da campate di dimensioni 12x6,66 m, pur utilizzando un maggior numero di elementi, ha un impatto ambientale inferiore rispetto allo scenario 1 (12x13,33 m). A campate più corte, infatti, corrisponde l’uso di profili in acciaio più piccoli, che richiedono meno materiale ed energia per la produzione, con conseguente riduzione delle emissioni e del consumo di risorse. I profili più piccoli sono anche più facili da trasportare, riducendo gli impatti legati al trasporto. Tra gli scenari a 40 piani, lo scenario 6, che utilizza colonne in acciaio con travi e solai in legno, ha l’impatto ambientale più basso in entrambe le località, proprio grazie alla quantità di elementi in legno utilizzati.

Nelle alternative “best case”, in cui vengono selezionati materiali con il GWP più basso, gli impatti ambientali sono ridotti in media del 25,7% in Europa e del 16,3% in Nord America. Le maggiori riduzioni in Europa sono dovute principalmente a una maggiore disponibilità di alternative sostenibili per i

materiali da costruzione. Lo scenario tutto legno (5) mostra le riduzioni più significative, con un impatto inferiore del 48,7% in Europa e del 28,7% in Nord America, evidenziando i vantaggi delle pratiche sostenibili del legno ingegnerizzato. Gli scenari interamente in acciaio (1, 2, 7 e 8) mostrano variazioni minori nella riduzione dell'impatto ambientale, che vanno dal 16,3% al 35,1% in Europa e dall'11,3% al 25% in Nord America. Queste riduzioni meno marcate sono dovute al fatto che gli scenari "base" utilizzano prodotti in acciaio che hanno già un elevato contenuto di acciaio riciclato: 90% nei profili strutturali e 97% nelle barre di armatura. Gli acciai meno impattanti (100% di acciaio riciclato) quindi, determinano riduzioni degli impatti che risultano meno significative per l'acciaio rispetto al legno, che invece presenta una maggiore variabilità nell'impatto ambientale in base alle proprietà dei materiali e ai metodi di lavorazione. Dall'analisi delle alternative "best case" si rileva che gli impatti ambientali totali degli scenari nordamericani oscillano tra 129 e 200 kg di CO₂ equivalente per metro quadrato, mentre gli equivalenti europei totalizzano dai 97 ai 173 kg di CO₂ equivalente per metro quadrato.

L'alternativa "best case con materiali importati" è calcolata per il sito nordamericano a cui sono applicati materiali europei, poiché il loro impatto ambientale è oltre il 10% inferiore rispetto ai corrispettivi nordamericani. Nonostante l'impatto aggiuntivo del trasporto transoceanico, l'analisi

si mostra una riduzione media del 7,7% dell'impatto complessivo. Le maggiori riduzioni si registrano negli scenari con elementi in legno lamellare (9%-11%), mentre quelle per l'acciaio sono più contenute (4%-6%).

La tabella 2 riassume gli impatti al metro quadro dei vari scenari nelle cinque alternative valutate. In definitiva, gli scenari che utilizzano una maggiore quantità di elementi in legno lamellare hanno impatti totali inferiori rispetto a quelli con elementi in acciaio. Nello specifico, lo scenario 5, completamente in legno, ha l'impatto più basso negli scenari da 20 piani, mentre lo scenario 6, con travi e solai in legno, totalizza l'impatto più basso negli scenari da 40 piani. Analizzando gli impatti delle singole fasi LCA, è possibile evidenziare notevoli differenze tra gli scenari europeo e nordamericano. Nella fase di produzione (A1-A3), il "best case" europeo raggiunge una riduzione dell'impatto ambientale del 42% rispetto allo scenario di base, mentre il "best case" nordamericano mostra una riduzione del 31%. La fase di trasporto (A4) in Nord America si conferma particolarmente significativa in termini di GWP, con impatti ambientali quasi 3,6 volte superiori rispetto a quelli europei a causa delle distanze più lunghe e della logistica meno efficiente. Lo scenario di base del Nord America ha in media un impatto maggiore del 7,5% nella fase di costruzione (A5) rispetto all'Europa. La fase di fine vita mostra una variazione minima, con i "best case" che mostrano un decremento nella

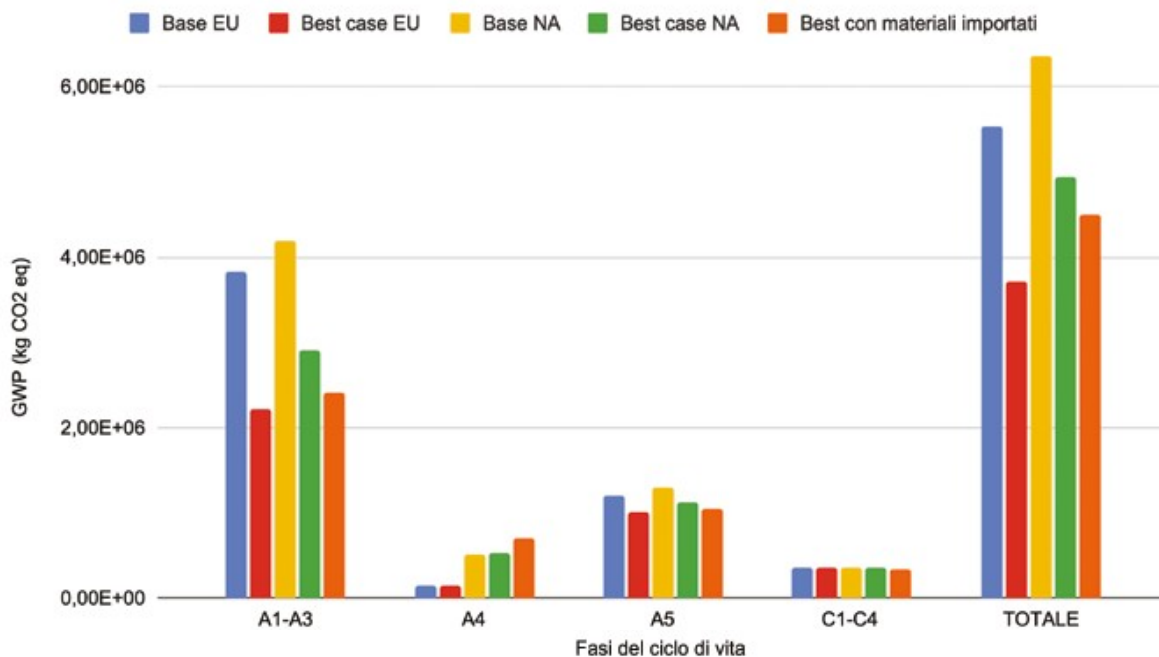


Figura 6. Impatti GWP di ciascuna fase LCA per le varie alternative dello scenario 5, per entrambe le località.

Tabella 2. Riepilogo degli impatti A1-C4 per i vari scenari, nelle tre alternative (kg CO₂ eq al metro quadro, secondo lo standard IPMS 4.2)

Piani	Scenari	Base Nord America	"Best case" Nord America	"Best case con materiali importati"	"Best case" Europa	Base Europa
20	1	198	178	167	164	191
	3	209	168	150	127	183
	5	167	129	118	97	145
	7	191	171	165	133	180
40	2	228	183	174	173	213
	4	238	196	175	141	202
	6	216	173	157	134	190
	8	224	200	190	156	209

fase di trasporto (C2) e trattamento dei rifiuti (C3), grazie all'uso di materiali più efficienti che portano a minori impatti ambientali anche nella loro dismissione. La figura 6 descrive gli impatti di ciascuna fase LCA per le varie alternative analizzate dello scenario 5, per entrambi i mercati individuati dallo studio.

Conclusioni

Lo studio, grazie all'utilizzo di un processo di modellazione e valutazione LCA che si avvale di specifici software, ha valutato i benefici ambientali derivanti dalla combinazione di acciaio e legno per gli edifici alti e il modo in cui le differenze di mercato tra Europa e Nord America influenzano questi risultati.

Gli scenari edilizi europei hanno generalmente impatti ambientali inferiori rispetto a quelli nordamericani, sia negli scenari di base che nelle alternative "best case". Questa differenza è dovuta principalmente alla maggiore disponibilità nel mercato europeo di EPD con impatti GWP inferiori, che possono essere la conseguenza di pratiche di produzione più sostenibili, fonti energetiche meno impattanti e standard ambientali più rigorosi in Europa. Inoltre, le EPD europee tendono ad avere proporzioni più elevate di materiali riciclati, riducendo ulteriormente gli impatti ambientali riportati.

Passando all'analisi dell'alternativa "best case con materiali importati", la ricerca ha rilevato che, nonostante l'elevato impatto derivante dal trasporto, l'utilizzo di materiali più sostenibili provenienti dall'estero può comportare una riduzione netta dell'impatto ambientale complessivo. Ciò evidenzia l'importanza dell'approvvigionamento di materiali a livello internazionale, a condizione che gli impatti dei trasporti siano gestiti in modo efficiente. I miglioramenti nella logistica dei trasporti e nell'efficienza del carburante,

come quelli osservati in Europa, potrebbero ridurre ulteriormente l'impronta ambientale delle attività di costruzione anche in altri mercati.

In generale, gli scenari con elementi costruttivi in legno lamellare mostrano impatti ambientali significativamente inferiori nella fase di produzione rispetto agli scenari costruiti in acciaio.

Le dimensioni delle campate e l'efficienza dei materiali sono fondamentali per ridurre gli impatti della struttura in acciaio. Campate più piccole e progettazioni ottimizzate che riducono l'uso dei materiali e il trasporto possono ridurre significativamente l'impatto sulla produzione e sui trasporti e, di conseguenza, sul GWP totale.

In definitiva, si può concludere che, sebbene le combinazioni di legno e acciaio non mostrino un chiaro vantaggio ambientale (gli edifici in legno lamellare sono più sostenibili in termini di GWP), le strutture ibride che combinano acciaio e legno possono offrire un equilibrio tra prestazioni strutturali e sostenibilità per i futuri grattacieli.

Bibliografia

- CEN - Comitato Europeo di Normazione (2011). EN 15978: Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo
- Helal, J., Stephan, A. e Crawford, R.H. (2020). The influence of structural design methods on the embodied greenhouse gas emissions of structural systems for tall buildings. Structures, 24, pp. 650-665
- European Energy Agency (2024). Addressing the environmental and climate footprint of buildings, EEA Report 09/2024.
- IPMSC - International Property Measurement Standards Coalition (2023). International Property Measurement Standards: All buildings.