

ARTICLE INFO

Received 17 September 2025
Revised 07 November 2025
Accepted 10 November 2025
Published 30 December 2025

IMPATTI AMBIENTALI E SOCIALI NEL CICLO VITA PER UNA PROGETTAZIONE A BASSO CARBONIO

ENVIRONMENTAL AND SOCIAL LIFE CYCLE IMPACTS FOR LOW-CARBON DESIGN

Elisabetta Palumbo, Irene Mazzei, Martina Perpetua, Francesco Pomponi

ABSTRACT

Il raggiungimento dell'obiettivo di edifici a basse emissioni entro il 2030 impone una revisione integrata dei criteri progettuali che includa una valutazione delle emissioni di carbonio lungo l'intero ciclo vita. Tale valutazione risulta significativamente influenzata da vincoli sismici e territoriali che possono incrementare il potenziale di riscaldamento globale fino al 20%. Tuttavia un approccio focalizzato unicamente sulla dimensione ambientale della sostenibilità rischia di restituire una lettura parziale, trascurando gli impatti sociali su salute e sicurezza dei lavoratori, attori fondamentali dell'intera filiera delle costruzioni. In questa prospettiva il contributo propone un approccio metodologico integrato, basato su E-LCA e , applicato alla componente strutturale di un edificio residenziale pubblico localizzato in un'area a sismicità media, rappresentativa del 60% del territorio della Toscana. L'analisi mette in relazione gli impatti ambientali e sociali dimostrando come la valutazione del rischio infortunistico possa supportare la definizione di metriche utili per i sistemi di etichettatura, sia a livello di prodotto che di edificio.

Achieving the objective of low-emission buildings by 2030 requires an integrated revision of design criteria, including an assessment of carbon emissions throughout the entire building life cycle. Seismic and territorial constraints strongly influence these assessments and can increase global warming potential by up to 20%. However, an approach focused solely on the environmental dimension of sustainability may provide only a partial interpretation. It may neglect the social impacts related to the health and safety of workers, who are fundamental actors across the entire construction supply chain. From this perspective, this study proposes an integrated methodological approach combining environmental and social life cycle assessments. It is applied to the structural component of a public residential building located in an area of medium seismicity, representative of 60% of the territory of Tuscany (Italy). The analysis relates environmental and social impacts, demonstrating how the accident risk assessment can support the definition of useful metrics for labelling systems, both at the product and building levels.

KEYWORDS

carbonio sull'intero ciclo vita, E-LCA, S-LCA, salute e sicurezza sul lavoro, impatti ambientali e sociali

carbon along the entire life cycle, E-LCA, S-LCA, health and safety at work, environmental and social impacts

Elisabetta Palumbo, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Engineering and Applied Sciences of the University of Bergamo (Italy). Her research activities focus primarily on tools and metrics for assessing the sustainability of materials, products, and buildings using the life cycle thinking approach. E-mail: elisabetta.palumbo@unibg.it

Irene Mazzei, PhD, is a visiting Researcher at the Department of Engineering and Applied Sciences of the University of Bergamo (Italy). She participates in projects to harmonise LCA practices at the product and building scales. E-mail: irene.mazzei@guest.unibg.it

Martina Perpetua is a Research Fellow at the University of Bergamo (Italy). She conducts research on whole-life carbon in construction sector. E-mail: perpetua.martina@unibg.it

Francesco Pomponi, PhD, is a Full Professor in Sustainability and Environment at the University of York (UK), a Senior Associate at the University of Cambridge's Institute for Sustainability Leadership (UK), and an Honorary Professor at the University of Cape Town (South Africa). E-mail: francesco.pomponi@york.ac.uk



Il settore delle costruzioni in Italia rappresenta una componente significativa dell'economia nazionale, contribuendo per circa il 5,4% al Prodotto Interno Lordo e impiegando oltre 1,3 milioni di persone, pari a circa il 5% dell'occupazione nazionale; oltre a incidere su bilanci economici e occupazionali il comparto edilizio incide sul bilancio delle emissioni nazionali di gas serra, con una quota stimata pari al 18%, prevalentemente riconducibili ai consumi energetici e all'impiego di materiali ad alta intensità di carbonio (Monosilio et alii, 2022; ISTAT, 2024; ISPRA, 2025). La rilevanza e l'interconnessione di questi impatti, che coinvolgono simultaneamente le dimensioni ambientale, economica e sociale della sostenibilità, rendono necessario un ripensamento delle prassi edilizie convenzionali (Pradeep, Rismanchi and Ngo, 2025).

In questo contesto il settore delle costruzioni si configura anche come leva strategica per la creazione di occupazione qualificata e per la transizione verso un'economia a basse emissioni (Legambiente, 2022). Affinché tale potenziale si traduca in una forza lavoro resiliente e sostenibile è essenziale garantire condizioni di lavoro dignitose e standard elevati in materia di salute e sicurezza, in linea con i principi della sostenibilità sociale. Il legame tra neutralità climatica e benessere dei lavoratori assume quindi un ruolo sempre più rilevante, come evidenziato tra le priorità della roadmap congiunta per la competitività e la decarbonizzazione, sviluppata nell'ambito del Clean Industrial Deal (European Commission, 2020, 2025).

Malgrado il quadro normativo nazionale sulla prevenzione degli infortuni e delle malattie professionali il settore continua a registrare un'elevata incidenza di infortuni e patologie professionali, con circa 40.000 casi annuali in aumento rispetto al quinquennio precedente (INAIL, 2023). Per superare tale criticità è necessario strutturare approcci che integrino le tre dimensioni della sostenibilità e modellino scenari alternativi coerenti con le specificità del contesto locale. A tal fine occorre disporre di metodiche di calcolo basate su Life Cycle Thinking (LCT) complementari e riconosciute quali la Environmental Life Cycle Assessment (E-LCA), il Life Cycle Costing (LCC) e la Social Life Cycle Assessment (S-LCA).

Questa esigenza di integrazione è stata ampiamente riconosciuta dalla letteratura come condizione necessaria per affrontare in modo sistemico la complessità della sostenibilità nel settore delle costruzioni. In particolare Larsen et alii (2022), analizzando oltre quaranta studi, mostrano come l'applicazione della LCT in edilizia stia ampliando il proprio campo di indagine dalla sola fase d'uso alle fasi di produzione, costruzione e fine vita. In questo quadro gli elementi critici di impatto ambientale riguardano la produzione dei materiali e la fase di demolizione che richiedono dati più solidi e una maggiore standardizzazione metodologica.

La centralità dell'approccio E-LCA si conferma anche nel quadro delle politiche europee di decarbonizzazione del Patrimonio edilizio, con particolare riferimento agli edifici a basso consumo energetico e ridotte emissioni di carbonio. In tale direzione la revisione della Direttiva EPBD IV (Energy Performance of Building Directive; European Parliament and Council of the European Union, 2024), la cui entrata in vigore è prevista per il 2027, introduce l'obbligo di calcolare le emissioni lungo tutte le fasi del ciclo vita (Whole Life Carbon – WLC), indivi-

duando proprio nella E-LCA lo strumento cardine per la quantificazione delle emissioni di CO₂. Sin dalle sue prime formulazioni metodologiche (Schmidt et alii, 1992) lo sviluppo della E-LCA dovrebbe essere accompagnato dalla considerazione degli impatti sulla salute correlati all'ambiente di lavoro. Tale esigenza trova riconoscimento esplicito anche nelle linee guida UNEP (2009) per la , dove la voce 'salute e sicurezza' è indicata come sottocategoria specifica all'interno del gruppo stakeholder 'lavoratori'.

Nel contesto edilizio tuttavia, mentre E-LCA e LCC hanno raggiunto un livello di maturità metodologica più avanzato, la S-LCA si configura ancora come una metodologia in fase di consolidamento. Nonostante i significativi progressi compiuti negli ultimi anni volti a rafforzare la robustezza analitica e la rilevanza applicativa (Hamed et alii, 2016; Norris, Aulisio and Norris, 2012; Traverso and Mankaa, 2025), la persistente carenza di dati sociali accessibili, affidabili e comparabili costituisce un vincolo metodologico sostanziale; tale limite incide sia sull'evoluzione teorica della disciplina sia sulla sua implementazione operativa in contesti applicativi concreti (Kühnen and Hahn, 2017; Arvidsson et alii, 2018; Ayassamy and Pellerin, 2023). Tale criticità è in parte attribuibile alla scarsa disponibilità di dati empirici e alla limitata propensione degli stakeholder a condividere informazioni sensibili, ostacolando una lettura contestualizzata e realistica degli impatti (Backes and Traverso, 2023). Gli indicatori sociali riguardano infatti dimensioni complesse quali le condizioni di lavoro, l'accesso alle tutele normative e previdenziali e la sicurezza, rendendo difficile una misurazione sistematica e comparabile.

Rispetto alle più recenti riflessioni sul ruolo del settore edilizio nella transizione ecologica diventa sempre più evidente che la sola decarbonizzazione non sia sufficiente a garantire la sostenibilità complessiva del costruito. Come sottolinea Ness (2024) è necessario affiancare alle strategie low-carbon i principi di sufficienza, valutando anche le dimensioni sociali quali il benessere e la sicurezza dei lavoratori al fine di evitare approcci riduttivi centrati esclusivamente sulla CO_{2eq}. Parallelamente la prospettiva proposta da Sposito e De Giovanni (2023) sottolinea la necessità di affrontare la complessità dei sistemi antropici attraverso l'integrazione di strumenti multidimensionali (che integrino LCA, ERA ed ESA), aprendo la strada a modelli di valutazione capaci di cogliere le interazioni tra impatti ambientali e sociali.

Alla luce delle premesse che inquadrano il tema della sostenibilità ambientale e sociale nel settore edilizio il presente contributo propone un approccio metodologico integrato E-LCA / S-LCA, valido per migliorare il processo decisionale attualmente basato esclusivamente sull'E-LCA (Ayassamy and Pellerin, 2023), applicato al caso studio di un edificio residenziale, di proprietà pubblica nella Regione Toscana, progettato in conformità ai requisiti sismici della zona 3 (bassa sismicità) e alle condizioni previste per la zona climatica D. Un tale approccio metodologico integrato, volto a connettere gli impatti ambientali derivanti dai materiali da costruzione (valutati secondo l'E-LCA) con l'indicatore 'salute e sicurezza dei lavoratori', è in linea con le UNEP Guidelines for S-LCA (UNEP, 2020).

In particolare l'obiettivo è correlare l'indicatore ambientale Global Warming Potential (GWP) con un indicatore sociale relativo a 'salute e sicurezza

dei lavoratori', elaborato a partire da dati ufficiali sugli infortuni nel settore edile italiano. Il lavoro si articola in due sezioni principali: la prima è dedicata alla quantificazione degli impatti ambientali associati alla struttura portante dell'edificio, adottando il framework europeo Level(s) come riferimento metodologico; la seconda è focalizzata sull'analisi del rischio lavorativo, con l'obiettivo di proporre un modello valutativo più completo e integrato della sostenibilità, capace di coniugare dimensioni ambientali e sociali sin dalle fasi iniziali del ciclo vita edilizio.

Il contributo si distingue per il suo potenziale impatto positivo sulla comunità scientifica, proponendo una prospettiva multidimensionale e replicabile per l'analisi della sostenibilità nel settore delle costruzioni e al tempo stesso favorendo l'avanzamento di metodologie valutative capaci di integrare dimensioni ambientali e sociali in modo coerente e comparabile.

Modello integrato E-LCA / S-LCA: approccio metodologico applicato all'edilizia | Il presente studio, sviluppato applicando il metodo LCA a un edificio campione, ha portato alla definizione di un modello concettuale volto a integrare l'indicatore GWP, previsto dalla metodologia WLC, con un indicatore sociale relativo alla salute e sicurezza dei lavoratori, espresso come livello di rischio, elaborato a partire da dati ufficiali sugli incidenti sul lavoro nel settore edile italiano. La Figura 1 sintetizza l'approccio metodologico adottato, in cui l'analisi sulla componente sociale si sviluppa a partire dalle fasi a maggior impatto ambientale (GWP).

Sebbene lo studio si configuri come un primo tentativo di coordinare E-LCA e S-LCA, tale coordinamento non implica ancora una fusione quantitativa tra le metriche ambientali e sociali pertanto si è scelto di considerare i due ambiti in modo complementare, sviluppando l'analisi sociale a partire dai processi e dalle fasi che hanno maggiore impatto (hotspot) in termini di GWP nella valutazione ambientale. Questa impostazione rappresenta un primo passo verso un modello valutativo più articolato in cui le relazioni tra impatti ambientali e sociali potranno essere ulteriormente approfondite attraverso criteri condivisi di pesatura e normalizzazione.

Tale orientamento trova riscontro anche in letteratura in cui diversi studi hanno mostrato come un approccio integrato che combina E-LCA e S-LCA consenta di valutare in maniera più completa la sostenibilità, focalizzandosi sugli hotspot del sistema: ad esempio Wang, Su e Wu (2022) hanno analizzato un prodotto di illuminazione industriale a LED, evidenziando come le fasi più impattanti dal punto di vista ambientale coincidano con quelle a maggior rischio sociale; in modo analogo Ghisellini, Passaro e Ulgiati (2023) hanno applicato un approccio integrato al sistema di gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici in Italia, mostrando benefici ambientali e sociali ma anche criticità legate a trasporto e condizioni di lavoro. Questi contributi dimostrano che l'analisi congiunta delle due dimensioni, ambientale e sociale, è particolarmente utile per individuare nodi critici e orientare strategie di miglioramento, in linea con quanto sviluppato anche nel nostro lavoro.

Nello specifico la fase di analisi dello studio ha riguardato la quantificazione degli impatti ambientali, espressi in kg CO_{2eq}, associati alla struttura portante di un edificio residenziale multiutenza sviluppato su due livelli. L'edificio (Figg. 2, 3), concepito per ac-

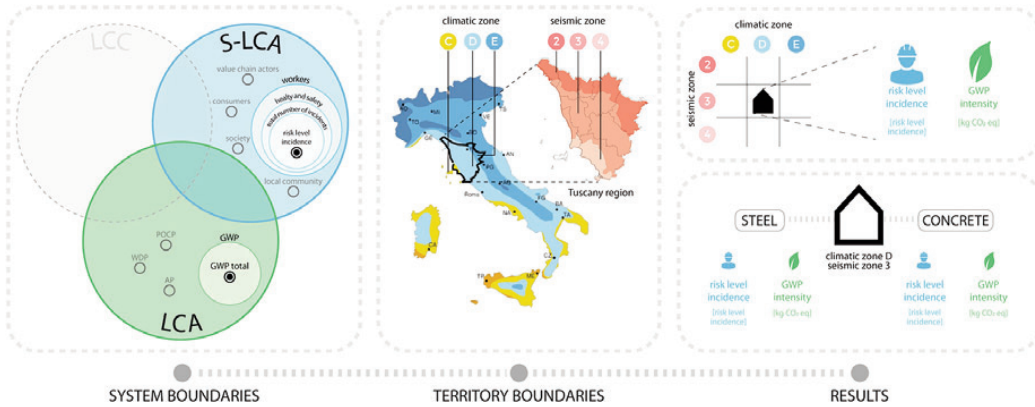


Fig. 1 | Conceptual visualisation of the integrated E-LCA / S-LCA model showing the correlation between environmental impacts (GWP) and social risk (health and safety of workers) in construction (credit: D. De Vito, 2025).

cogliere due tipologie abitative distinte, presenta una configurazione funzionale articolata con al piano terra gli alloggi previsti dal Programma ministeriale 'Dopo di noi', destinati a minori e adulti privi di supporto familiare e ospitati in modo temporaneo o permanente e potenzialmente affetti da disabilità, e al piano superiore trovano otto alloggi sociali rivolti a fasce vulnerabili della popolazione.

Dal punto di vista strutturale, l'edificio si caratterizza per un telaio in acciaio controventato, composto da colonne e travi di piano in profili HEB260 saldati agli elementi verticali; la controventatura orizzontale utilizza profili HEB160 disposti secondo uno schema a triangolo. A sostegno del telaio principale è presente un sistema secondario di irrigidimento verticale in calcestruzzo armato gettato in opera, che aumenta la resistenza complessiva e la capacità di controventatura. Le fondazioni sono a trave rovescia in calcestruzzo armato e i solai sono realizzati con pannelli prefabbricati alleggeriti (predalles) e inserti di polistirene espanso, progettati per assicurare un comportamento rigido da diaframma e distribuire efficacemente i carichi orizzontali.

Lo studio E-LCA adotta come riferimento metodologico il framework Level(s), sviluppato a livello europeo per analizzare e valutare le prestazioni di sostenibilità degli edifici lungo tutto il loro ciclo vita (Dodd et alii, 2017). Nell'ambito dello studio l'analisi si concentra sull'indicatore 1.2 – Potenziale di Riscaldamento Globale nel Ciclo Vita (Life Cycle Global Warming Potential), utilizzando le opzioni semplificate di rendicontazione previste dal sistema Level(s), con un focus esclusivo sulle fasi 'from cradle to gate' (Fig. 4), corrispondenti ai moduli A1 (estrazione e approvvigionamento delle materie prime), A2 (trasporto al sito produttivo) e A3 (processi di produzione). La scelta metodologica è motivata dalla volontà di identificare l'impatto ambientale dei materiali impiegati nella struttura in queste fasi iniziali del ciclo vita, in relazione alla variabilità degli elementi costruttivi adottati e in funzione della zona sismica in cui è situato l'edificio. In tale contesto quindi l'obiettivo principale dell'analisi non è estendere la valutazione agli impatti lungo l'intero ciclo vita, ma valutare le differenze prestazionali e ambientali legate alla progettazione strutturale. Per questo motivo le fasi successive della costruzione (A4-A5), dell'uso (B1-B7) e del fine vita (C1-C4) non sono state incluse nella presente analisi.

La modellazione è stata effettuata con l'ausilio del software One Click LCA, privilegiando valori di impatto di tipo primario, come le Dichiarazioni Am-

bientali di Prodotto (EPD); inoltre, al fine di comprendere la variabilità degli impatti ambientali e valutare scenari alternativi di decarbonizzazione, oltre allo scenario di progetto ('baseline'), è stato introdotto un secondo scenario ('improved') che prevede la sostituzione dell'acciaio con un materiale dal maggiore contenuto di riciclato e l'impiego di calcestruzzo C30/37, più rappresentativo del contesto produttivo nazionale in quanto comunemente utilizzato per edifici residenziali e commerciali (Coppola et alii, 2023; Tab. 1).

In particolare nella definizione dello scenario migliorativo è stato adottato un criterio di sostituzione dei materiali volto a ridurre il potenziale di riscaldamento globale (GWP), garantendo al contempo la medesima funzione tecnica e la stessa classe prestazionale delle soluzioni originarie. Le alternative selezionate non introducono materiali radicalmente differenti, ma rappresentano varianti a minore impatto rispetto ai prodotti già previsti nello scenario di riferimento. Allo scopo sono state privilegiate due strategie: l'impiego di calcestruzzi con resistenze equivalenti, ma caratterizzati da un minor contenuto di clinker o da un maggiore utilizzo di materiale riciclato, e la sostituzione di acciai e componenti prefabbricati caratterizzati da un più elevato contenuto di riciclato o da processi produttivi più efficienti.

La fattibilità delle sostituzioni è stata verificata rispetto alla reale disponibilità sul mercato nazionale ed europeo e alla conformità alle normative tecniche vigenti, assicurando così la piena compatibilità con le esigenze strutturali e prestazionali dell'edificio. Questo approccio ha consentito di mantenere la coerenza funzionale tra scenario di riferimento e scenario migliorativo, dimostrando come sia possibile conseguire una riduzione degli impatti ambientali attraverso scelte mirate di materiali a più basso GWP senza alterare la tipologia costruttiva né le prestazioni richieste.

A seguito dell'analisi E-LCA è stata avviata la valutazione degli impatti sociali, con particolare riferimento alla categoria 'salute e sicurezza dei lavoratori', considerata prioritaria e di particolare rilevanza nei cantieri edili e nelle attività di produzione dei materiali da costruzione. Tra gli indicatori sociali utilizzati per l'analisi si annoverano il tasso di infortuni sul lavoro, la mortalità professionale e la presenza di dispositivi di protezione individuale, elementi fondamentali per la valutazione delle condizioni di rischio e tutela nei contesti produttivi e di cantiere (INAIL, 2023). Un approccio robusto di S-LCA è stato delineato da Mancini et alii (2018) per l'analisi

sociale delle catene di approvvigionamento delle materie prime. In questo studio la 'salute e sicurezza dei lavoratori' è descritta in categorie di impatto quali salario equo, orario di lavoro, salute e sicurezza, protezione sociale e libertà di associazione (Fig. 5); questi parametri sono misurati attraverso fonti statistiche internazionali, banche dati sociali e documentazione normativa, con l'obiettivo di garantire trasparenza, comparabilità e rilevanza sociale nell'ambito della valutazione S-LCA.

Per valutare gli impatti sociali sui lavoratori lungo la filiera dei materiali da costruzione, con particolare riferimento a calcestruzzo e acciaio il presente studio impiega un approccio 'operativo'. L'analisi sociale è stata circoscritta ai lavoratori coinvolti nelle fasi di produzione e di costruzione dell'edificio, in coerenza con i confini di sistema adottati per l'E-LCA, limitati ai moduli A1-A3. Tale scelta ha consentito di garantire un allineamento metodologico tra le dimensioni ambientale e sociale, individuando come stakeholder rilevanti esclusivamente le categorie direttamente esposte nelle fasi in esame. La valutazione è stata condotta utilizzando dati primari di tipo statistico provenienti da fonti nazionali¹, così da assicurare robustezza e comparabilità dei risultati, evitando approcci qualitativi meno sistematici. I lavoratori rappresentano infatti la classe sociale per la quale sono disponibili informazioni affidabili e regionalizzate, rendendo possibile una prima applicazione del modello.

Altre categorie di operatori che possano essere coinvolte con impatti negativi lungo l'intero ciclo vita dell'edificio saranno considerate nelle future estensioni della metodologia. In questa fase, seguendo le indicazioni della letteratura internazionale e delle linee guida UNEP (2020), l'analisi si concentra sugli stakeholder più direttamente coinvolti, per valutare in modo mirato gli aspetti di salute e sicurezza nella filiera dei materiali da costruzione.

Oltre alla valutazione dell'incidenza degli infortuni lo studio prende in esame la diffusione e la tipologia di malattie professionali correlate all'ambiente lavorativo, sempre sulla base dei dati INAIL (2025). Ciascun indicatore è stato successivamente valutato attraverso un sistema di punteggio basato sul rischio, in linea con la metodologia proposta da Mancini et alii (2018) che consente di attribuire un livello di criticità sociale alle diverse fasi e materiali della filiera edilizia.

Per la valutazione del rischio legato agli infortuni sono state definite tre soglie di rischio – basso, medio e alto – basate sull'incidenza degli infortuni nei diversi settori. Il calcolo delle soglie è stato effettuato determinando la media del numero di casi di infortunio per settore (Equazione 1) e la relativa deviazione standard (Equazione 2); la media rappresenta una misura di tendenza centrale, mentre la deviazione standard quantifica la dispersione dei dati rispetto a tale valore. La definizione degli intervalli di rischio si basa sullo scostamento dei valori osservati rispetto alla media, consentendo di individuare categorie di rischio (basso, medio, alto) fondate su variazioni significative rispetto al comportamento medio del campione.

$$\text{Equazione 1)} \bar{x} = \sum x_i / n$$

$$\text{Equazione 2)} \sigma = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n - 1}$$

dove 'x' è il valore medio, 'xi' si riferisce ai singoli valori, 'n' corrisponde al numero di valori nel cam-

pione e σ corrisponde alla deviazione standard. Le soglie di rischio sono state quindi definite come 'basso rischio' (incidenza $< \text{media} - 0,5 \sigma$), 'medio rischio' ($\text{media} - 0,5 \sigma \leq \text{incidenza} \leq \text{media} + 0,5 \sigma$) e 'alto rischio' (incidenza $> \text{media} + 0,5 \sigma$).

Carbonio incorporato e rischio lavorativo: un approccio integrato alle filiere produttive | Ai fini dello studio l'analisi si è concentrata esclusivamente sugli elementi che costituiscono la struttura portante dell'edificio. Nella composizione della struttura analizzata, riportata in Figura 6, il calcestruzzo è la componente predominante, rappresentando circa il 97% della massa complessiva dell'intera struttura.

L'analisi LCA, focalizzata sulla valutazione del GWP, è stata condotta sia sulla versione 'baseline' dell'edificio sia su una versione ipotetica 'improved', nella quale alcuni materiali – in particolare calcestruzzi e acciaio – sono stati sostituiti con alternative a minore impatto ambientale, grazie a un maggiore impiego di componenti riciclati o a soluzioni di alleggerimento. Tali modifiche hanno determinato una riduzione dell'impatto del 31,3% per le fondazioni, del 42,2% per colonne, pilastri e travi in acciaio, del 25,6% per le sole strutture in acciaio del primo piano e del 16,7% per le controventature in acciaio degli orizzontamenti (Tab. 2). La Figura 7 presenta una panoramica delle emissioni in tonnellate di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ attraverso l'indicatore GWP calcolato per le fasi A1-A3 degli elementi della struttura portante dell'edificio, relativo alla struttura 'baseline' e a quella 'improved'.

Per l'analisi degli impatti sociali sono stati utilizzati i dati ISTAT (2023) relativi al numero di addetti nei settori Ateco 2007 'Estrazione di pietra, sabbia e argilla' [081], 'Trasporto di merci su strada e servizi di trasloco' [494], 'Fabbricazione di elementi da costruzione in metallo' [251] e 'Fabbricazione di prodotti in calcestruzzo, cemento e gesso' [236] e al numero di infortuni sul lavoro, in particolare nella Regione Toscana per una puntuale e specifica analisi territoriale della distribuzione degli eventi infortunistici. L'analisi del ciclo vita è stata condotta considerando le fasi A1-A2-A3 per la produzione del calcestruzzo, mentre per l'acciaio sono state incluse esclusivamente le fasi A2 e A3. Tale scelta metodologica si rende necessaria poiché le attività estrattive primarie della produzione del minerale di ferro non risultano localizzate sul territorio italiano. La caratterizzazione degli addetti è riportata in Tabella 3.

Questa scelta è supportata dal documento I-STAT 'Import-Export materie prime' (Morrone and Lanci, 2020) che evidenzia da un lato la dipendenza strutturale dell'Italia dalle importazioni di materie

prime, dall'altro che le attività minerarie associate alla produzione dell'acciaio sono localizzate in diverse aree geografiche del pianeta. A titolo esemplificativo i grandi operatori del settore come Arcelor-Mittal² dichiarano di estrarre le materie prime in Canada, Brasile, Ucraina e Liberia, di conseguenza non è stato possibile includere nella valutazione il contributo occupazionale e infortunistico della fase A1 per l'acciaio, poiché i dati ISTAT utilizzati per l'analisi territoriale non coprono le attività estrattive estere.

I risultati riportati nelle Figure 8 e 9 mostrano il numero degli infortuni totali registrati nell'anno 2023 e la loro incidenza sul numero di addetti documentati in ogni Regione. La media e la deviazione standard sono state quindi calcolate sull'incidenza degli infortuni registrati nel 2023 e i risultati ottenuti hanno consentito di definire le categorie di rischio (Fig. 10).

I dati ISTAT relativi alla Regione Toscana, area di riferimento per il caso studio in esame, hanno evidenziato che nel 2022 la produzione di opere in acciaio per l'edilizia ha un'incidenza media degli infortuni sul lavoro pari a 1,2% per la fase A2 e a 0,5% per la fase A3, mentre la produzione di calcestruzzo ha un'incidenza pari a 2,9% per la fase A1, 1,3% per la fase A2 e 0,6% per la fase A3, per un totale del 4,8% sulle fasi A1-A3: nell'insieme i dati indicano un rischio medio-alto di incidenti sul lavoro nella produzione di acciaio e calcestruzzo per l'edilizia.

Limiti, criticità, replicabilità e trasferibilità dello studio | Il lavoro presenta alcuni limiti che meritano di essere discussi. In primo luogo le dimensioni ambientali e sociali sono state analizzate separatamente: questa scelta deriva dall'assenza, ad oggi, di valori soglia o criteri condivisi che consentano un confronto diretto tra indicatori eterogenei, come l'indicatore GWP e i fattori di rischio infortunistico per i lavoratori. Tale impostazione ha permesso di mantenere rigore metodologico, ma ha inevitabilmente ridotto la possibilità di restituire una visione pienamente integrata della sostenibilità; in prospettiva sarà necessario sviluppare strumenti capaci di mettere in relazione le due dimensioni attraverso criteri di pesatura e normalizzazione condivisi a livello internazionale.

Dal punto di vista sociale l'analisi si è concentrata esclusivamente sui lavoratori coinvolti nelle fasi di produzione e costruzione (A1-A3), scelta dettata sia dalla necessità di mantenere coerenza con i confini dell'analisi ambientale sia dalla disponibilità di dati statistici affidabili e comparabili a livello nazionale; ciò da un lato ha rafforzato la solidità dei risultati, dall'altro ha escluso altri stakeholder potenzialmente rilevanti come le comunità locali o gli

utenti finali che potranno essere inclusi in futuri sviluppi della metodologia. In sintesi il lavoro ha privilegiato rigore, coerenza e applicabilità immediata a scapito di una visione più ampia e integrata; le criticità individuate non rappresentano limiti insormontabili, ma piuttosto punti di partenza per ulteriori approfondimenti volti a estendere l'analisi a un numero maggiore di attori sociali, a fasi ulteriori del ciclo vita e a scenari progettuali più innovativi.

Tuttavia lo studio presentato si caratterizza per un elevato grado di replicabilità, grazie alla condizione trasparente delle fonti e delle informazioni utilizzate. Per l'analisi ambientale sono stati resi disponibili i materiali, le quantità e le specifiche relative al software e ai database impiegati, consentendo ad altri ricercatori di riprodurre i risultati o adattarli a contesti differenti. Sul piano sociale l'utilizzo di banche dati pubbliche e liberamente accessibili, come quelle di ISTAT e INAIL, garantisce non solo la verificabilità dei dati ma anche la possibilità di estendere la metodologia ad altri casi studio. L'approccio può inoltre essere trasferito ad altri stakeholders, a condizione che siano disponibili dati strutturati e sistematici in archivi ufficiali, rendendo la metodologia applicabile in contesti territoriali e settoriali diversi.

Riflessioni conclusive | In Italia la presenza di quattro zone sismiche comporta requisiti strutturali specifici che influenzano tanto la scelta dei materiali quanto l'impronta di carbonio degli edifici. Studi recenti evidenziano come nelle aree ad elevata pericolosità sismica l'adozione di rinforzi strutturali possa determinare un aumento del GWP iniziale compreso tra il 10% e il 20% rispetto a edifici situati in zone a bassa sismicità. Alla luce di queste evidenze la valutazione di specifiche filiere produttive diventa cruciale per promuovere una decarbonizzazione efficace lungo l'intero ciclo vita dell'edificio, ma un approccio focalizzato esclusivamente sulla dimensione ambientale della sostenibilità rischia di trascurare aspetti altrettanto rilevanti, come quelli legati al benessere e alla salute dei lavoratori che rappresentano la spina dorsale del settore delle costruzioni.

Durante la fase di analisi è emerso che l'integrazione degli aspetti sociali negli strumenti di valutazione degli impatti ambientali dei prodotti da costruzione è attualmente riferita alle pietre ornamentali, a livello europeo attraverso l'indicatore 2.7 dell'etichettatura Ecolabel per i rivestimenti ornamentali e a livello italiano all'interno dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) relativi all'arredo urbano. Tuttavia non esiste ancora una proposta metodologica strutturata che consenta di integrare in modo coerente gli impatti ambientali (E-LCA) con quelli sociali (S-LCA).

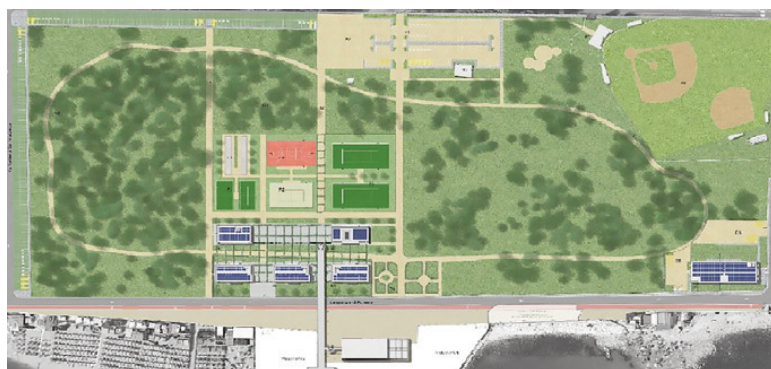


Fig. 2 | Masterplan where the building under analysis is located (credit: StudioloTre, 2025).



Fig. 3 | 3D model of the building (credit: StudioloTre, 2025).

Lo studio qui presentato, pur limitato a un singolo edificio e a un numero contenuto di materiali, si propone come schema metodologico preliminare volto a definire una metrica integrata di valutazione degli impatti ambientali e sociali. Questo approccio, se affinato ed esteso a ulteriori indicatori rilevanti – quali il salario equo e la parità di genere – potrebbe essere integrato nei sistemi di etichettatura, sia a scala di prodotto che a scala edilizia, contribuendo a una lettura più completa e multidimensionale della sostenibilità nel settore delle costruzioni.

L’adozione di approcci di ricerca integrati, come quello proposto, contribuisce direttamente a diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), promuovendo condizioni di lavoro più sicure e dignitose (SDG 8), sostenendo la realizzazione di edifici

resilienti e inclusivi (SDG 11), incoraggiando modelli di produzione e consumo più responsabili attraverso l’uso del Life Cycle Thinking (SDG 12) e riducendo le emissioni climateranti lungo l’intero ciclo vita (SDG 13). Allo stesso tempo l’integrazione tra le dimensioni ambientali e sociali genera sinergie indirette con altri obiettivi chiave: tutela della salute e del benessere (SDG 3), promozione dell’innovazione tecnologica e infrastrutturale (SDG 9), riduzione delle disuguaglianze territoriali (SDG 10).

È necessario riconoscere anche la presenza di potenziali compromessi, ad esempio tra la riduzione delle emissioni e i costi economici (SDG 1 e SDG 8) o tra la sicurezza dei lavoratori e la rapidità dei processi costruttivi. In questo scenario complesso l’approccio integrato E-LCA / S-LCA si propone co-

me uno strumento operativo per bilanciare benefici e compromessi, orientando le decisioni progettuali verso una sostenibilità autenticamente multidimensionale e sistemica.

The construction sector in Italy represents a significant component of the national economy, contributing about 5.4% to the gross domestic product and employing over 1.3 million people, equivalent to about 5% of national employment; in addition to influencing economic and employment dynamics, the building sector affects national greenhouse gas emissions, accounting for an estimated 18%, mainly attributable to energy consumption and the use

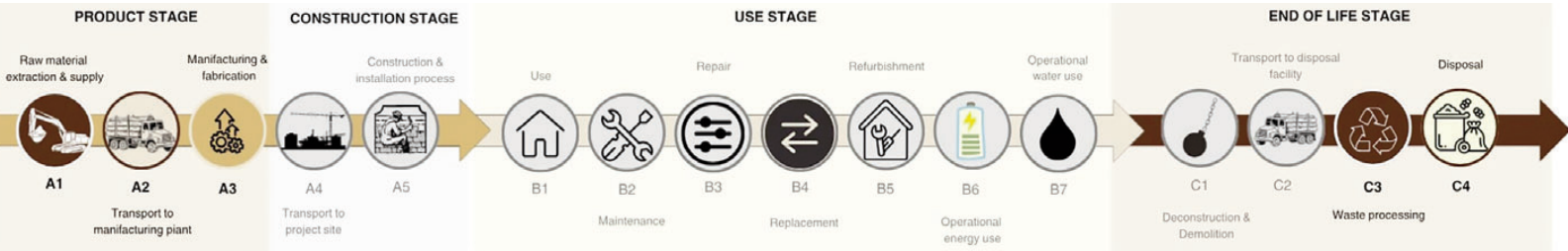


Fig. 4 | System boundaries adopted in the E-LCA (credit: the Authors, 2025).

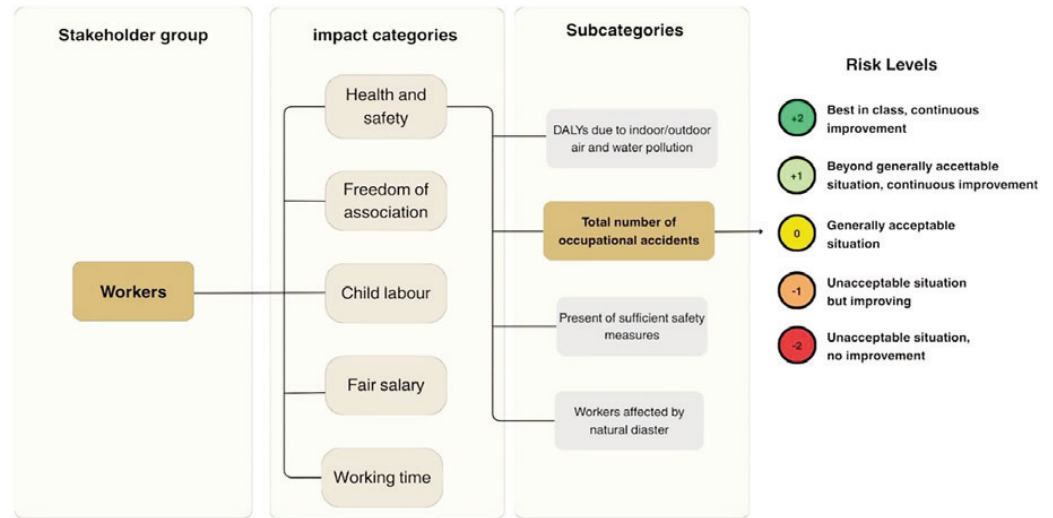
Classification	Component name	Materials	
		Baseline	Improved
1.1.1.Standard foundations	Concrete layer	Ready mix concrete C12/15	Ready mix concrete C12/15
1.1.1.Standard foundations	Reinforcement steel bars	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
1.1.1.Standard foundations	inverted steel beams	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete C30/37
1.1.3.Lowest floor construction	concrete casting for slab (Ground floor)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
1.1.3.Lowest floor construction	reinforcement steel for slab (Ground floor)	electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
1.1.3.Lowest floor construction	Expanded polystyrene layer for slab (Ground floor)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
1.1.3.Lowest floor construction	concrete layer for slab (Ground floor)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.2.1.Floors	concrete casting for slab (First floor)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.2.1.Floors	reinforcement steel for slab (First floor)	Electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
2.2.1.Floors	Expanded polystyrene layer for slab (First floor)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.2.1.Floors	concrete layer for slab (First floor)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.3.1.Roof structure	concrete casting for slab (cover)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.3.1.Roof structure	reinforcement steel for slab (cover)	Electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
2.3.1.Roof structure	Expanded polystyrene layer for slab (cover)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.3.1.Roof structure	concrete layer for slab (cover)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.1.1.Steel frames	Reinforcement steel bars for ground floor	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
2.1.3.Concrete casings to steel frames	Concrete casting for ground floor	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.1.1.Steel frames	Reinforcement steel bars for first floor	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
2.1.3.Concrete casings to steel frames	Concrete casting for first floor	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.1.1.Steel frames	Steel columns	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1.1.Steel frames	Steel beams	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1.1.Steel frames	Steel braces	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1. Frame	gypsum board	Reinforced gypsum board	Reinforced gypsum board
2.1. Frame	column insulation	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.2.1.Floors	cementitious screed	Lightweight ready mix concrete	Lightweight ready mix concrete

Tab. 1 | Materials and components of the building’s load-bearing structure, classified according to Level(s) categories, for ‘baseline’ and ‘improved’ scenarios (credit: StudiInTre, 2025).

Fig. 5 | Social impact categories associated with workers; the health and safety category, particularly the indicator based on workplace accidents, is highlighted because it is relevant to this study (source: Mancini et alii, 2018).

Tab. 2 | Impact reduction -GWP Intensity kg CO_{2eq}/ kg between original and improved building (credit: the Authors, 2025).

Tab. 3 | Characterisation of workers with ATECO codes divided by phase (credit: the Authors, 2025).



of high-carbon-intensity materials (Monosilio et al., 2022; Istituto Nazionale di Statistica (lit. National Institute of Statistics) ISTAT, 2024; Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (lit. Higher Institute for Environmental Protection and Research) ISPRA, 2025). The relevance and interconnection of these impacts, which simultaneously involve the environmental, economic, and social dimensions of sustainability, necessitate rethinking conventional building practices (Pradeep, Rismanchi and Ngo, 2025). In this context, the construction sector is also a strategic lever for creating qualified employment and transitioning toward a low-emission economy (Legambiente, 2022). It is essential for the sector to develop a resilient and sustainable workforce, ensuring decent working conditions and high health and safety standards, in line with the principles of social sustainability. The link between climate neutrality and workers' well-being therefore plays an increasingly important role, as indicated by the priorities of the joint roadmap for competitiveness and decarbonisation under the Clean Industrial Deal, a European Commission strategy to decarbonise industry while boosting competitiveness (European Commission, 2020, 2025).

Despite current regulations, the sector continues to record a high incidence of accidents and occupational diseases, with an increase of about 40,000 cases per year compared to the previous five-year period (INAIL, 2023). Addressing this critical issue requires calculation methods based on life cycle thinking (LCT) and complementary recognised approaches, such as environmental life cycle assessment (E-LCA), life cycle costing (LCC), and social life cycle assessment (S-LCA). This allows for structuring approaches that integrate the three dimensions of sustainability and the modelling of alternative scenarios consistent with the local context.

The need for integration has been widely recognised in the literature as a necessary condition for systematically addressing the complexity of sustainability in the construction sector. Larsen et alii (2022), analysing over 40 studies, showed how the application of LCT in buildings is expanding its field of investigation from the use phase to the production, construction, and end-of-life phases. In this framework, the critical environmental impact elements concern the production of materials and the demolition phase, which require robust data and greater methodological standardisation.

The importance of the E-LCA approach is also confirmed in European decarbonisation policies for

Building element	Quantity (Kg)	Original	GWP intensity (kg CO _{2eq} /kg)	Improved	GWP intensity (kg CO _{2eq} /kg)	Difference (%)
Foundation	103,766.36	Ready mix concrete C 35/45	0.16	Ready mix concrete C30/37	0.11	-31.3
Slab (ground floor, first floor, roof)	6,661.35	Hot rolled electro-welded steel mesh	0.78	Cold rolled electrowelded steel mesh	0.65	-16.7
First floor steel structure	47,291.98	Reinforcement rebars (85% recycled)	0.78	Reinforcement rebars (100% recycled)	0.58	-25.6
Steel columns, beam and braces	115,658.7	Structural steel beams (85% recycled)	0.9	Structural steel beams (100% recycled)	0.52	-42.2

Concrete		Stone	
A1	[081] Quarrying of stone, sand and clay	No data	
A2	[494] Road haulage and removal services	[494] Road haulage and removal services	
A3	[236] Manufacture of concrete, cement and plaster products	[251] Manufacture of metal construction elements	

the building stock, particularly those targeting low-energy buildings and reduced carbon emissions. In this direction, the revised Energy Performance of Buildings Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024), scheduled to enter into force in 2027, introduces the obligation to calculate emissions across all life cycle phases (Whole Life Carbon – WLC). The directive identifies E-LCA as the key tool for quantifying CO_{2eq} emissions. Since its early methodological formulations (Schmidt et alii, 1992), the development of E-LCA has required consideration of health impacts related to the working environment. This need is also explicitly recognised in the United Nations Environment Programme (UNEP, 2009) guidelines for S-LCA, which designate 'health and safety' as a subcategory within the 'workers' stakeholder group.

In the building context, however, while E-LCA and LCC have reached greater methodological maturity, S-LCA remains in the consolidation process. Despite significant recent progress in strengthening analytical robustness and practical relevance (Hamed et alii, 2016; Norris, Aulisio and Norris, 2012; Traverso and Mankaa, 2025), the persistent lack of accessible, reliable, and comparable social data remains a substantial methodological constraint; this limitation affects both the theoretical evolution of the discipline and its operational implementation in prac-

tical contexts (Kühnen and Hahn, 2017; Arvidsson et alii, 2018; Ayassamy and Pellerin, 2023). This issue is partly attributable to the scarce availability of empirical data and stakeholders' limited willingness to share sensitive information, hindering a contextualised and realistic assessment of impacts (Backes and Traverso, 2023). Social indicators involve complex dimensions, such as working conditions, access to protective measures, and safety, making systematic and comparable measurement difficult.

Regarding the most recent reflections on the role of the construction sector in the ecological transition, it is increasingly evident that decarbonisation alone is not sufficient to ensure the overall sustainability of the built environment. As Ness (2024) emphasised, integrating low-carbon strategies with principles of sufficiency is necessary; evaluating social dimensions, such as workers' well-being and safety, is also important to avoid reductive approaches focused exclusively on CO_{2eq}. At the same time, the perspective proposed by Sposito and De Giovanni (2023) underlines the need to address the complexity of anthropic systems by integrating multidimensional tools that combine LCA, Environmental Risk Assessment, and Ecosystem Service Assessment. This approach paves the way for evaluation models capable of capturing the interactions between environmental and social impacts.

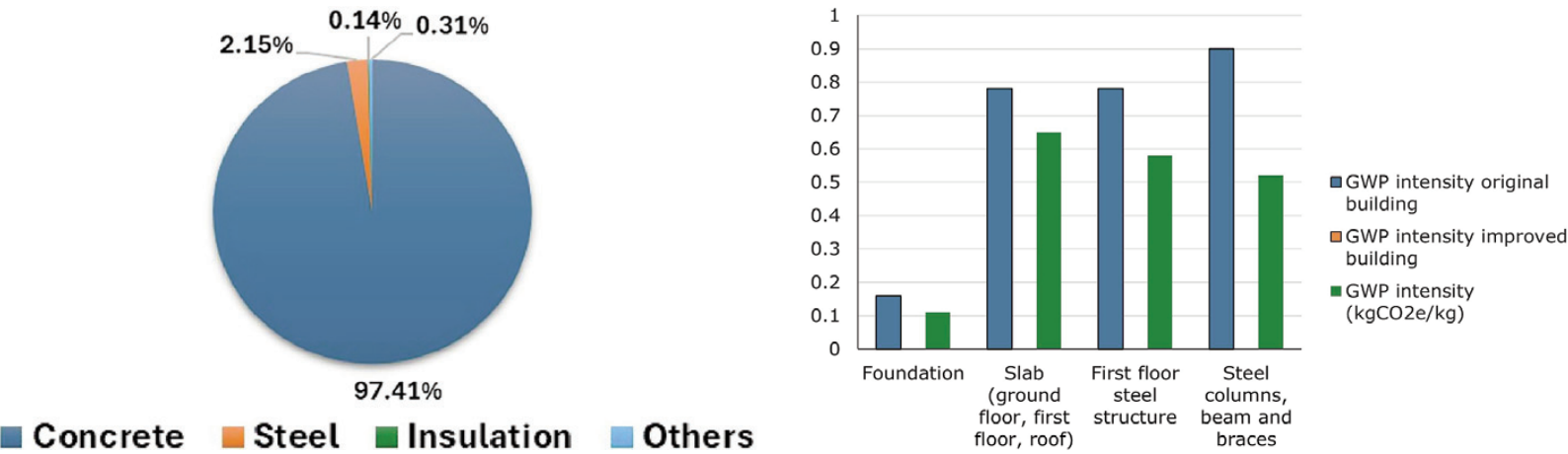


Fig. 6 | Mass composition of the building's structure, broken down by categories of aggregated materials (credit: the Authors, 2025).

Fig. 7 | GWP (in tons of CO_{2eq}) calculated for the A1-A3 phases of the load-bearing elements for both the 'baseline' and 'improved' structures. In the 'improved' structure, steel and concrete were modelled using materials with lower environmental impact (credit: the Authors, 2025).

In light of the premises framing the theme of environmental and social sustainability in the construction sector, this study proposes an integrated E-LCA / S-LCA methodological approach, which has been shown as a positive way forward to enhance decision-making currently based solely on E-LCA (Ayasamy and Pellerin, 2023). It is applied to the case study of a publicly owned residential building in Tuscany (Italy), designed in accordance with the seismic requirements of zone 3 (low seismicity) and the conditions provided for climatic zone D. This integrated methodological approach aims to connect the environmental impacts from the E-LCA assessment of construction materials with the social indicator of 'health and safety of workers', in line with the UNEP Guidelines for S-LCA (UNEP, 2020).

In particular, the objective is to correlate the environmental indicator of global warming potential (GWP) with a social indicator related to 'workers' health and safety', developed based on official accident data in the Italian construction sector. This work is structured into two main sections. The first examines the quantification of environmental impacts associated with the building's load-bearing structure, adopting the European Level(s) framework as the methodological reference. The second section focuses on occupational risk analysis and proposes a comprehensive and integrated sustainability evaluation model that combines environmental and social dimensions from the initial stages of the building life cycle.

This contribution stands out for its potential to have a positive impact on the scientific community. On the one hand, it offers a multidimensional and replicable perspective for the analysis of sustainability in the construction sector. On the other hand, it promotes the adoption of evaluation tools that jointly consider environmental and social aspects from the initial stages of the building life cycle.

Integrated E-LCA / S-LCA methodological approach applied to a building | This study applied the LCA method to a sample building to define a conceptual model integrating GWP from the WLC methodology with a social indicator related to workers' health and safety. The social indicator, expressed as a risk level, was developed based on official data on workplace accidents in the Italian construction sector. Figure 1 summarises the methodolog-

ical approach adopted, in which social analysis focuses on the phases with the highest environmental impact (GWP). Although this study constitutes an early attempt to integrate E-LCA and S-LCA, it does not imply a quantitative merging of environmental and social metrics. Rather, the choice was made to consider the two domains in a complementary way, developing the social analysis starting from the processes and phases that have the most significant impact (hotspots) in terms of GWP in the environmental assessment. This approach represents the first step toward a more comprehensive evaluation model in which the relationships between environmental and social impacts can be further explored through shared criteria for weighting and normalisation.

This orientation is also reflected in the literature, in which several studies have shown that an integrated approach combining E-LCA and S-LCA enables a more complete assessment of sustainability by focusing on system hotspots. For example, Wang, Su, and Wu (2022) analysed an industrial LED lighting product, highlighting how the phases most impactful from an environmental perspective coincide with those posing the most significant social risk. Similarly, Ghisellini, Passaro, and Ulgiati (2023) applied an integrated approach to the management system of electrical and electronic waste in Italy. They found not only environmental and social benefits but also criticalities related to transportation and working conditions. These contributions demonstrate that the joint analysis of the two environmental and social dimensions helps identify critical nodes and guide improvement strategies, consistent with the approach developed in our work.

Specifically, the analysis phase of the study involved the quantification of environmental impacts, expressed in kg CO_{2eq}, associated with the load-bearing structure of a multi-user residential building developed over two levels. The building (Fig. 2, 3), designed to accommodate two distinct types of housing, presents a functional layout. On the ground floor are the dwellings provided by the ministerial programme 'Dopo di noi', intended for minors and adults without family support, who may be hosted temporarily or permanently, and who could have disabilities. The upper floor contains eight social housing units for vulnerable segments of the population. From a structural point of view, the building is characterised

by a braced steel frame composed of columns and floor beams in HEB260 profiles welded to the vertical elements; the horizontal bracing uses HEB160 profiles organised in a triangular scheme. Supporting the main frame is a secondary vertical stiffening system in cast-in-place reinforced concrete, which increases overall strength and bracing capacity. The foundations are inverted beam-reinforced concrete. The floors, made with lightweight prefabricated panels (predalles) and expanded polystyrene inserts, are designed to ensure diaphragm behaviour and effectively distribute horizontal loads.

The E-LCA study adopts the Level(s) framework as a methodological reference, developed at the European level, to analyse and assess the sustainability performance of buildings throughout their entire life cycles (Dodd et alii, 2017). The analysis focuses on indicator 1.2 – Life Cycle Global Warming Potential using the simplified reporting options provided by the Level(s) system. It exclusively examines cradle-to-gate phases (Fig. 4), corresponding to modules A1 (raw material extraction and supply), A2 (transport to the production site), and A3 (production processes).

The methodological choice aims to identify the environmental impact of the materials used in the structure during the initial phases of the life cycle. This analysis considers the variability of the construction elements adopted and the seismic zone in which the building is located. In this context, the main objective of the study is therefore not to extend the assessment to impacts throughout the entire life cycle. Rather, it seeks to evaluate performance and environmental differences related to structural design. For this reason, the subsequent phases of construction (A4-A5), use (B1-B7), and end of life (C1-C4) were not included in the analysis.

The modelling was carried out using the One Click LCA software, prioritising primary impact values, such as Environmental Product Declarations (EPDs). Moreover, a second scenario ('improved') was introduced alongside the design scenario ('baseline') to understand the variability of environmental impacts and evaluate alternative decarbonisation scenarios; the improved scenario involves replacing steel with a material having higher recycled content and using C30/37 concrete, which is commonly used for residential and commercial buildings in the national production context (Coppola et alii,

Fig. 8 | Number of accidents in the cement and steel processing sectors (credit: the Authors, 2025).

Fig. 9 | Incidence of accidents in the cement and steel processing sectors, expressed as a percentage (credit: the Authors, 2025).

Fig. 10 | Average level of incidence risk, expressed as a percentage (credit: the Authors, 2025).

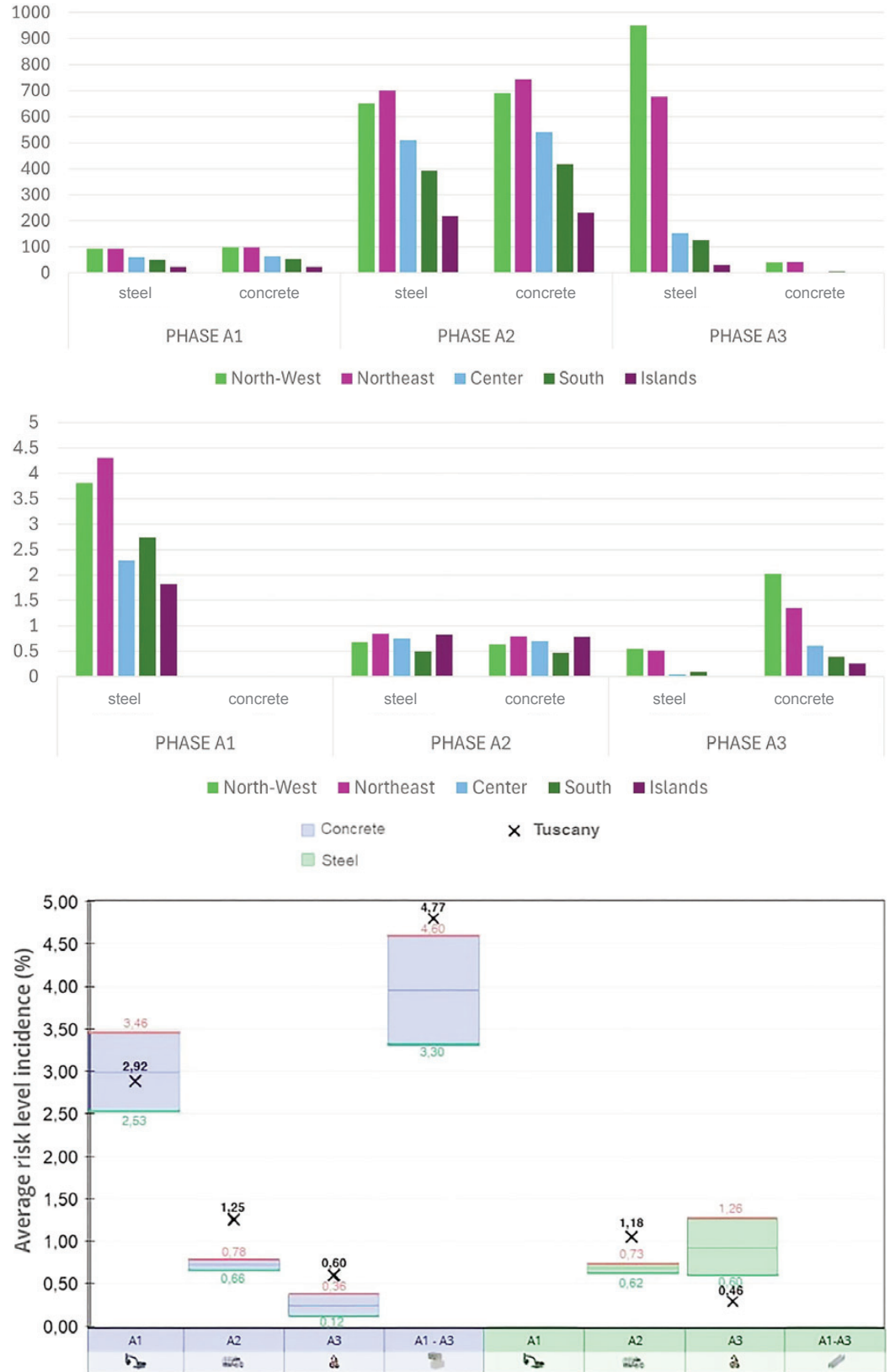
2023; Tab. 1). In defining the improved scenario, a material substitution criterion was adopted to reduce the GWP while ensuring the same technical function and performance class as the original solutions. The selected alternatives do not introduce radically different materials, but they represent lower-impact variants compared to the products already planned in the reference scenario. For this purpose, two strategies were applied: (i) the use of concrete with equivalent strength but lower clinker content or higher recycled material content; and (ii) the replacement of steel and prefabricated components with those that have higher recycled content or are produced using more efficient processes.

The feasibility of the substitutions was verified in terms of actual availability in the national and European markets and compliance with current technical standards. This approach ensures full compatibility with the building's structural and performance requirements while maintaining functional consistency between the reference and improved scenarios. It also demonstrates how targeted choices of lower-GWP materials can reduce environmental impacts without altering the construction type or the required performance.

Following the E-LCA analysis, the social impact evaluation focused on the category of 'health and safety of workers'. This is considered a priority in construction sites and in production activities involving construction materials. Among the social indicators used for the analysis are the workplace accident rate, occupational mortality, and the presence of personal protective equipment; these are fundamental elements for assessing risk conditions and protection in production and construction site contexts (INAIL, 2023).

A robust S-LCA approach was outlined by Mancini et alii (2018) for the social analysis of raw material supply chains. In this context, 'workers' health and safety' is described in terms of impact categories, such as fair wages, working hours, health and safety, social protection, and freedom of association (Fig. 5). These parameters are measured using international statistical sources, social databases, and regulatory documentation. The aim is to ensure transparency, comparability, and social relevance within the S-LCA assessment.

To evaluate the social impacts on workers along the supply chains for concrete and steel construction materials, this study employs an operational approach. The social analysis was confined to workers involved in the production and construction phases of the building. This scope aligns with the system boundaries adopted for the E-LCA, which are limited to modules A1-A3. This choice enabled methodological alignment between the environmental and social dimensions by identifying only those stakeholder categories directly exposed to impacts in the phases examined. The assessment was conducted



ed using primary statistical data from national sources¹, ensuring robustness and comparability of the results while avoiding less systematic qualitative approaches. Workers represent the social class for which reliable and region-specific information is available, enabling this initial application of the model.

Other categories of operators that may have negative impacts throughout the entire life cycle of the building will be considered in future extensions of the methodology. At this stage, to evaluate health and safety aspects in the construction material supply chain, the analysis focuses on the stakeholders

most directly involved, following international literature and UNEP (2020) guidelines.

In addition to evaluating accident incidence, this study examines the prevalence and types of occupational diseases associated with the work environment, based on INAIL (2025) data. Each indicator was subsequently assessed through a risk-based scoring system, in line with the methodology proposed by Mancini et alii (2018). This method allows the assignment of a level of social criticality to the different phases and materials of the construction supply chain.

For the assessment of accident-related risk, three risk thresholds – low, medium, and high – were defined based on the incidence of accidents across sectors. The thresholds were calculated by determining the mean number of accident cases per sector (Equation 1) and the related standard deviation (Equation 2). The mean represents a measure of central tendency, while the standard deviation quantifies the dispersion of the data with respect to this value. The definition of risk intervals is based on the deviation of the observed values from the mean. This approach enables risk categories (low, medium, and high) to be identified on the basis of significant variations from the average behaviour of the sample.

$$\text{Equation 1) } \bar{x} = \sum x_i / n$$

$$\text{Equation 2) } \sigma = \sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2 / n - 1)}$$

where ‘ $\bar{x}$ ’ is the mean value, ‘ x_i ’ refers to the individual values, ‘ n ’ corresponds to the number of values in the sample, and ‘ σ ’ corresponds to the standard deviation. Therefore, the risk thresholds were defined as ‘low risk’ (incidence < mean – 0.5 σ), ‘medium risk’ (mean – 0.5 $\sigma \leq$ incidence $\leq$ mean + 0.5 σ), and ‘high risk’ (incidence > mean + 0.5 σ).

Embedded carbon and occupational risk: an integrated approach to production chains

For the purposes of this study, the analysis focused exclusively on the elements constituting the building’s load-bearing structure. In the analysed structure shown in Figure 6, concrete is the predominant component, accounting for about 97% of the total mass.

The LCA analysis, focused on the GWP evaluation, was conducted both on the ‘baseline’ and the hypothetical ‘improved’ versions of the building. In the latter, some materials, particularly concrete and steel, were replaced with lower-impact alternatives incorporating more recycled components or lightweighting solutions. These modifications resulted in impact reductions of 31.3% for foundations, 42.2% for steel columns, pillars, and beams, 25.6% for steel structures of the first floor only, and 16.7% for the steel bracing of floor slabs (Tab. 2). Figure 7 provides an overview of emissions in tons of CO_{2eq} through the GWP calculated for the A1-A3 phases of the load-bearing building elements. The data are shown relative to the ‘baseline’ and ‘improved’ structures.

For the analysis of social impacts, ISTAT (2023) data were used for the number of employees in the ATECO 2007 sectors of ‘Extraction of stone, sand, and clay’ [081], ‘Road freight transport and moving services’ [494], ‘Manufacture of metal construction elements’ [251], and ‘Manufacture of concrete, cement, and plaster products’ [236]. Data on workplace accidents, particularly in the Tuscany region, were also used for a precise, specific territorial analysis of accident distribution. The life cycle analysis covered phases A1-A3 for concrete production and A2 and A3 for steel production. This methodological choice is necessary because the primary extractive activities for iron ore production are not located in Italy. The characterisation of the employees is reported in Table 3.

This choice is supported by the ISTAT document Import-Export of Raw Materials (Morrone and Lanci, 2020), which highlights both Italy’s structural dependence on raw material imports and the fact that mining activities associated with steel production are located in different geographic areas of the

world. For example, major operators in the sector, such as ArcelorMittal², declare that they extract raw materials in Canada, Brazil, Ukraine, and Liberia. Consequently, phase A1 employment and accident data for steel could not be included in the assessment, as the ISTAT data used for territorial analysis did not cover foreign extractive activities.

The results shown in Figures 8 and 9 present the total number of accidents recorded in 2023 and their incidence on the number of employees documented in each region. The means and standard deviations were then calculated for the 2023 accident incidence, and the results were used to define risk categories (Fig. 10).

The ISTAT data relating to the Tuscany region, the reference area for the case study under examination, showed that in 2022, the production of steel construction works had average workplace accident rates of 1.2% for phase A2 and 0.5% for phase A3. For concrete production, the incidence was 2.9% for phase A1, 1.3% for phase A2, and 0.6% for phase A3, for a total of 4.8% across phases A1-A3. Overall, the data indicate a medium-high risk of workplace accidents in the production of steel and concrete for construction.

Limitations, replicability, and transferability of the study

This work has some limitations that deserve discussion. First, the environmental and social dimensions were analysed separately. This choice stems from the current absence of threshold values or shared criteria for directly comparing heterogeneous indicators, such as GWP and occupational risk factors. This approach allowed for maintaining methodological rigour but inevitably reduced the possibility of providing a fully integrated view of sustainability. Future work should develop tools that relate the two dimensions using internationally shared weighting and normalisation criteria.

From a social perspective, the analysis focused exclusively on workers involved in the production and construction phases (A1-A3). This choice was influenced by the need to maintain consistency with the boundaries of the environmental analysis and by the availability of reliable and comparable statistical data at the national level. This approach strengthened the robustness of the results but excluded other potentially relevant stakeholders, such as local communities or end users, who could be included in future methodological extensions. In summary, the work prioritised rigour, consistency, and immediate applicability over a broader and more integrated vision. The identified criticalities are insurmountable limits but rather starting points for further investigations. These initiatives could extend the analysis to a greater number of social actors, additional life cycle phases, and more innovative design scenarios.

Nonetheless, this study demonstrates high replicability due to the transparent sharing of the sources and information used. For the environmental analysis, the materials, quantities, and specifications for the software and databases used were made available. This allows other researchers to reproduce the results or adapt them to different contexts. On the social side, the use of publicly available and freely accessible databases, such as those of ISTAT and INAIL, ensures not only data verifiability but also the possibility of extending the methodology to other case studies. The approach can also be applied to other stakeholders, provided structured and systematic data are available in official archives. This

makes the methodology applicable in different territorial and sectoral contexts.

Conclusion | In Italy, the presence of four seismic zones entails specific structural requirements that influence both the choice of materials and the carbon footprint of buildings. Recent studies highlight that in areas of high seismic hazard, the adoption of structural reinforcements can increase the initial GWP by 10-20% compared to buildings located in low-seismicity zones. In light of this evidence, the assessment of specific production chains is crucial for promoting effective decarbonisation throughout a building’s life cycle. However, an approach focused exclusively on the environmental dimension of sustainability may overlook equally relevant aspects, such as the well-being and health of workers, who comprise the backbone of the construction sector.

The analysis phase revealed the limited integration of social aspects into environmental impact assessment tools for construction products. At the European level, such integration exists for ornamental stones in indicator 2.7 of the Ecolabel for decorative coverings, and at the Italian level, within the minimum environmental criteria related to urban furniture. However, there is still no structured methodological proposal that allows for the coherent integration of environmental (E-LCA) and social (S-LCA) impacts.

The study presented here, although limited to a single building and a small number of materials, proposes a preliminary methodological framework. The approach aims to establish an integrated metric for assessing environmental and social impacts. If refined and extended to include additional relevant indicators, such as fair wages and gender equality, it could be incorporated into labelling systems, both at the product and building scales. This integration would contribute to a more comprehensive and multidimensional understanding of sustainability in the construction sector.

The adoption of integrated research approaches, such as the one proposed, directly contributes to achieving several Sustainable Development Goals (SDGs). It promotes safer and more dignified working conditions (SDG 8), supports the creation of resilient and inclusive buildings (SDG 11), encourages more responsible production and consumption patterns by using life cycle thinking (SDG 12), and reduces climate-altering emissions throughout the life cycle (SDG 13). At the same time, linking the environmental and social dimensions generates indirect synergies with other key goals. These include the protection of health and well-being (SDG 3), the promotion of technological and infrastructural innovation (SDG 9), and the reduction of territorial inequalities (SDG 10).

However, acknowledging potential trade-offs is also necessary, for example, between emissions reduction and economic costs (SDGs 1 and 8) or between worker safety and the speed of construction processes. In this complex scenario, the integrated E-LCA / S-LCA approach is proposed as an operational tool to balance benefits and trade-offs, guiding design decisions toward genuinely multidimensional and systemic sustainability.

Acknowledgements

This research was supported by the Department of Engineering and Applied Sciences, University of Bergamo (Italy), under the project ‘Creation of LCA databases for building materials and systems’ (Principal Investigator: Prof. E. Palumbo). The Authors gratefully acknowledge Studio INTRE, the civil engineering firm responsible for the design of the analysed building, for their valuable time, availability, and technical expertise.

All the Authors contributed synergistically to the writing of the article; however, E. Palumbo is responsible for conceptualisation, funding acquisition, writing, revision, editing and validation of the paper; both E. Palumbo and I. Mazzei are responsible for the methodology, formal analysis, and investigation; both Mazzei and M. Perpetua are responsible for the visualisation, data curation, and drafting of the paper. All the Authors, responsible for data curation, have read and approved the final version of the manuscript.

Notes

1) For more information, see the webpage: inail.it/portale/it/attivita-e-servizi/dati-e-statistiche/banca-dati-delle-professioni.html [Accessed 30 September 2025].

2) For more information, see the webpage: corporate.arcelormittal.com/industries/tailings-management [Accessed 30 September 2025].

Reference

- Arvidsson, R., Hildenbrand, J., Baumann, H., Islam, K. M. N. and Parsmo, R. (2018), “A method for human health impact assessment in social LCA – Lessons from three case studies”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, pp. 690-699. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-016-1116-7 [Accessed 30 September 2025].
- Ayassamy, P. and Pellerin, R. (2023), “Social life-cycle assessment in the construction industry – A review of characteristics, limitations, and challenges of S-LCA through case studies”, in *Sustainability*, vol. 15, issue 19, article 14569, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151914569 [Accessed 30 September 2025].
- Backes, J. G. and Traverso, M. (2023), “Social life cycle assessment in the construction industry – Systematic literature review and identification of relevant social indicators for carbon reinforced concrete”, in *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, pp. 7199-7233. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10668-023-03005-6 [Accessed 30 September 2025].
- Coppola, L., Palumbo, E., Coffetti, D., Panozzo, C., Rapelli, S., Cellurale, M. and Rinaldi, C. (2023), *Edilizia costruzioni – Studio LCA della filiera del calcestruzzo e degli aggregati riciclati*, ENEA, Milano. [Online] Available at: pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=744:edilizia-costruzioni-studio-lca-della-filiera-del-calcestruzzo-e-degli-aggregati-riciclati&catid=3 [Accessed 30 September 2025].
- Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M. and Donatello, S. (2017), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings – Parts 1 and 2 – Introduction to Level(s) and how it works (Beta v1.0)*, document EUR 28899 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/827838 [Accessed 30 September 2025].
- European Commission (2025), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The Clean Industrial Deal – A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation*, document 52025DC 0085, COM/2025/85 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52025DC0085 [Accessed 30 September 2025].
- European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Sustainable Europe Investment Plan European Green Deal Investment Plan*, document 52020DC0021, COM/2020/21 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52020DC0021 [Accessed 30 September 2025].
- European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, document 32024L1275. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj [Accessed 30 September 2025].
- Ghisellini, P., Passaro, R. and Ulgiati, S. (2023), “Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Management in Italy According to EU Directives”, in *Environments*, vol. 10, issue 7, article 106, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/environments10070106 [Accessed 30 September 2025].
- Hamed, A., Maister, K., Murali, S. H., Radwan, L., Paternostro, A. and Ciroth, A. (2025), *PSILCA – A Product Social Impact – Life Cycle Assessment Database*, version 4.0. [Online] Available at: openca.org/wp-content/uploads/2025/07/PSILCA_manual_for-v.4_04072025.pdf [Accessed 30 September 2025].
- INAIL (2025), *Tabelle nazionali con cadenza mensile – Analisi della numerosità degli infortuni – Dati rilevati al 31 luglio 2025*. [Online] Available at: dati.inail.it/opendata_files/downloads/daticoncadenzamensileinfotuni/Tabelle_nazionali_cadenza_mensile_Lug_2025.pdf [Accessed 30 September 2025].
- INAIL (2023), *Relazione annuale 2022*. [Online] Available at: lavorosi.it/fileadmin/user_upload/PRASSI_2023/inail-relazione-annuale-2022.pdf [Accessed 30 September 2025].
- ISPRA (2025), *Emissioni di gas serra – Nel 2023 in calo del 26% rispetto al 1990 – Le rinnovabili trainano il miglioramento – Resta critico il settore dei trasporti*, comunicato stampa, 25/03/2025. [Online] Available at: emissioni.sina.isprambiente.it/wp-content/uploads/2025/03/Comunicato-stampa-emissioni-gas-serra_2025.def_.pdf [Accessed 30 September 2025].
- ISPRA (2025), *Rapporto Rifiuti Speciali – Edizione 2025*. [Online] Available at: isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-speciali-edizione-2025 [Accessed 30 September 2025].
- ISTAT (2024), “Conti economici nazionali – Anno 2023”, in *istat.it*, 23/09/2024. [Online] Available at: istat.it/comunicato-stampa/conti-economici-nazionali-anno-2023 [Accessed 30 September 2025].
- ISTAT (2023), *Occupati e addetti per settore di attività economica (ATECO) – Anno 2023*. [Online] Available at: esploradati.istat.it/databrowser/#/it/dw/categories/IT1,Z0900EN,T,1.0/ENT_STRU/DICA_ASIAULP/IT1,183_285_DF_DIC_A_ASIAULP_3,1.0 [Accessed 30 September 2025].
- Kühnen, M. and Hahn, R. (2017), “Indicators in social life cycle assessment – A review of frameworks, theories, and empirical experience”, in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, issue 6, pp. 1547-1565. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12663 [Accessed 30 September 2025].
- Larsen, V. G., Tollin, N., Sattrup, P. A., Birkved, M. and Holmboe, T. (2022), “What are the challenges in assessing Circular Economy for the built environment? – A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 50, article 104203, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104203 [Accessed 30 September 2025].
- Legambiente (2022), “Decarbonizzare le costruzioni, la nuova sfida del settore edilizio”, in *Legambiente*, 08/11/2022. [Online] Available at: legambiente.it/comunicati-stampa/decarbonizzare-le-costruzioni-la-nuova-sfida-del-settore-edilizio/ [Accessed 30 September 2025].
- Mancini, L., Eynard, U., Eisfeldt, F., Ciroth, A., Blengini, G. A. and Pennington, D. (2018), “Social assessment of raw materials supply chains – A life cycle-based approach”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, issue 7, pp. 1474-1490. [Online] Available at: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f29c7adb-1f8a-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en [Accessed 30 September 2025].
- Monosilio, F., Altieri, G., Ricciardelli, E., Fimiani, C. and Forte, A. (eds) (2022), *Il ruolo del settore delle costruzioni nel sistema economico – Struttura, interdipendenze settoriali e crescita*. [Online] Available at: ance.it/wp-content/uploads/allegati/Ricerca_Ance-Istat_Importanza_del_settore_delle_costruzioni_Giugno_2024.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Morrone, M. and Lanci, C. (eds) (2020), *Import-Export materie prime – La dipendenza dell'Italia dai Paesi esteri (2020)*. [Online] Available at: unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2020/11/Ecomondo2020-ISTAT.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Ness, D. (2024), “La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? Limitare e ridistribuire l’aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? Constrain and redistribute growth in floor area”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 30 September 2025].
- Norris, C. B., Aulizio, D. and Norris, G. A. (2012), “Working with the Social Hotspots Database – Methodology and findings from 7 social scoping assessments”, in Dornfeld, D. A. and Linke, B. S. (eds), *Leveraging Technology for a Sustainable World – Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23-25, 2012, Springer Berlin Heidelberg, pp. 581-586. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_98 [Accessed 30 September 2025].
- Pradeep, M. S., Rismanchi, B. and Ngo, T. (2025), “Dynamic and Circular Life Cycle Sustainability Assessments (DCLCSAs) for prefabricated buildings – A systematic review and conceptual model”, in *Building and Environment*, vol. 284, article 113396, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113396 [Accessed 30 September 2025].
- Schmidt, A., Jernes, J. E., Hansen, L. E. and Jensen, A. A. (1992), “Health impacts and life-cycle assessment”, in Nordic Council of Ministers (ed.), *Product life cycle assessment – Principles and methodology*, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, pp. 232-262. [Online] Available at: books.google.it/books?id=6Doxe-YmGYUC&printsec=frontcover&hl=it&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false [Accessed 30 September 2025].
- Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 30 September 2025].
- Traverso, M. and Mankaa, R. N. (2025), “The social life cycle developments and implementations”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 30, pp. 1011-1017. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-025-02480-5 [Accessed 30 September 2025].
- UNEP – United Nations Environment Programme (2020), *Guidelines for social life cycle assessment of products and organisations 2020*. [Online] Available at: lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2021/01/Guidelines-for-Social-Life-Cycle-Assessment-of-Products-and-Organizations-2020-22.1.21sml.pdf [Accessed 30 September 2025].
- UNEP – United Nations Environment Programme (2009), *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7912/-Guidelines%20for%20Social%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Products-20094102.pdf?sequence=3&%3BisAllowed=1 [Accessed 30 September 2025].
- Wang, S., Su, D. and Wu, Y. (2022), “Environmental and Social Life Cycle Assessments of an Industrial LED Lighting Product”, in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 95, article 106804, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106804 [Accessed 30 September 2025].