

in apnea

Sommario

| | |
|--|------------|
| ABSTRACT..... | 3 |
| INTRODUZIONE | 3 |
| I CAMBIAMENTI CLIMATICI E GLI IMPATTI DEL SETTORE EDILE..... | 4 |
| GPP, NORMATIVA ITALIANA CAM EDILIZIA E PROTOCOLLI DI SOSTENIBILITA': criticità e sovrapposizioni..... | 7 |
| STRUMENTI E INDICATORI VALUTABILI | 12 |
| CICLO DI VITA DELL'EDIFICIO E IL LIFE CYCLE ASSESMENT | 12 |
| VALUTARE LA SOSTENIBILITÀ ATTRAVERSO GLI INDICATORI..... | 13 |
| STATO DELL'ARTE..... | 14 |
| INTERESSE TERRITORIALE | 17 |
| INTERESSE PER LE FASI | 19 |
| ANDAMENTO NELL'INTERVALLO DI TEMPO | 20 |
| DEFINIZIONE DELL'AMBITO DI INDAGINE..... | 21 |
| OBIETTIVI | 25 |
| METODOLOGIA | 26 |
| 1° Fase - Caratterizzazione tecnologica dell'opera | 28 |
| Verifica soddisfacimento criteri base art. 2.4.14 e 2.6.2 e Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita | 28 |
| 2° Fase - Valutazione del livello di disassemblabilità..... | 30 |
| 3° Fase - Stima delle emissioni di CO ₂ -eq..... | 31 |
| DESCRIZIONE DELLE SOLUZIONI A SECCO..... | 41 |
| SOLUZIONI A SECCO DI TIPO METALLICO..... | 41 |
| SOLUZIONI A SECCO IN LEGNO..... | 45 |
| APPLICAZIONE AI CASI STUDIO..... | 53 |
| DESCRIZIONE DEI CASI STUDIO..... | 53 |
| 1° fase Verifica pre – demolizione ai sensi dell' <i>art. 2.4.14 Disassemblaggio</i> | 55 |
| 1° fase Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita | 72 |
| 2° fase LIVELLO DI DISASSEMBLABILITA' | 75 |
| 3° fase STIMA DELLE EMISSIONI DI CO ₂ eq | 89 |
| CASI STUDIO IN ACCIAIO (Avenida Central Building e Melopee School) | 90 |
| CASI STUDIO IN LEGNO (Villa GP e Complesso Cenni) | 99 |
| RISULTATI E DISCUSSIONE..... | 106 |
| 1° fase <i>Disassemblaggio e Fine vita art.2.4.14 e Demolizione selettiva, recupero e riciclo</i> ai sensi dell' <i>art. 2.6.2</i> | 106 |
| 2° fase LIVELLO DI DISASSEMBLABILITA' | 112 |
| 3° fase STIMA DELLE EMISSIONI DI CO ₂ eq | 117 |

| | |
|---|------------|
| Sintesi dei risultati | 132 |
| CONCLUSIONI | 134 |
| L'edilizia pubblica come volano di innovazione per la progettazione | 134 |
| Recuperare o demolire e ricostruire: questo è il dilemma | 138 |
| LINEE GUIDA per il Design for Deconstruction: costruire anticipando il riuso..... | 138 |
| L'approccio conservatore vs alternative esistenti nel mondo dell'edilizia..... | 140 |
| Bibliografia | 143 |

ABSTRACT

Il settore edile gioca un ruolo chiave nell'ottica della riduzione del 55% delle emissioni di gas climalteranti entro il 2030 (rispetto ai livelli del 1990), nonché della piena decarbonizzazione entro il 2050. Da una attenta analisi di letteratura e studi pregressi si evince che la riduzione complessiva degli impatti ambientali dei materiali da costruzione passa attraverso l'instaurarsi di una continuità sostenibile tra la fase di fine vita del manufatto edilizio e la fase produttiva dei singoli componenti edilizi, secondo il concetto della "chiusura del cerchio" produttivo. In particolare, in Italia, con riferimento alla fase di fine vita dell'edificio (BS EN 15978: 2011), i Criteri Ambientali Minimi (Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione di interventi edilizi, per l'appalto di lavori per interventi edilizi e per l'appalto congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi - DECRETO 23 giugno 2022, in GU Serie Generale n. 183 del 06-08-2022) prevedono, tra i Criteri Base, la verifica dei criteri 2.4.14 *Disassemblaggio e Fine vita* e 2.6.2 *Demolizione selettiva, recupero e riciclo*.

Dunque, a questo livello di adozione dei CAM, il presente lavoro di ricerca propone due ulteriori criteri ovvero la valutazione del Livello di Disassemblabilità del sistema edilizio e la stima delle emissioni di CO_{2eq} in atmosfera durante le attività di demolizione selettiva del sistema edilizio.

Attraverso l'applicazione di una metodologia articolata in fasi, dalla caratterizzazione tecnologica dell'opera alla verifica del soddisfacimento dei criteri base art. 2.4.14 e 2.6.2 e delle risorse materiche in input ed in output, sviluppando una valutazione del livello di disassemblabilità e una stima delle emissioni di CO_{2eq}, si intende fornire informazioni di carattere sia tecnologico che ambientale, strumenti essenziali in fase di progettazione e di gestione che possono essere principi base per la redazione di Linee Guida per il DfD (Design for Deconstruction) ma anche per l'elaborazione di *Metodologie di ottimizzazione delle soluzioni progettuali per la sostenibilità (LCA e LCC)* come previsto dall'art. 2.7.2 e implementate in software di calcolo specifici come auspicato dall'art. 2.7.3 Progettazione in BIM.

Tale metodologia, articolata in fasi, è stata applicata a quattro casi studio rappresentativi delle più utilizzate tecniche costruttive di sistemi assemblati 'a secco' in acciaio e in legno.

ABSTRACT GRAFICO

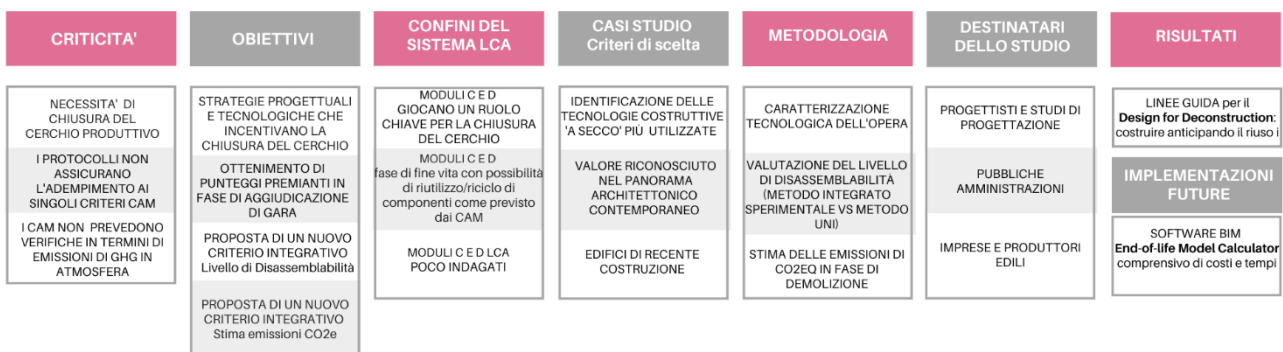


FIG.1 ABSTRACT GRAFICO

INTRODUZIONE

La definizione di sviluppo sostenibile data dal Rapporto Brundtland ha ormai compiuto trent'anni, tuttavia, risulta ancora oggi complesso individuare una definizione universale relativa al concetto di sostenibilità. La definizione data dal Rapporto Brundtland, risalente al 1987, parla di sviluppo sostenibile come di uno sviluppo capace di soddisfare i bisogni del presente senza pregiudicare i bisogni delle generazioni future. Tale definizione attribuisce, di conseguenza, all'aggettivo sostenibile il significato di qualcosa di durevole e permanente nel tempo.

Lo sviluppo sostenibile è stato promulgato attraverso diverse procedure e strategie a livello teorico e pratico.

Per sensibilizzare l'opinione pubblica sono state utilizzate spesso immagini evocative e di grande impatto emotivo. Per far leva sulla comunità scientifica si è cercato di individuare parametri quantitativi che potessero mettere in luce in modo oggettivo l'entità delle problematiche rilevate, attraverso livelli di soglia da rispettare come ad esempio il tasso di CO₂, l'innalzamento delle acque, le concentrazioni delle polveri sottili in atmosfera ed altri. In edilizia, le richieste prescrittive delle normative per la promozione dello sviluppo sostenibile si sono fatte sempre più pressanti, e talvolta poco comprensibili, agli occhi di tutti quegli architetti e ingegneri che hanno una formazione culturale lontana dai temi della sostenibilità e dell'ecologia.

Il mondo dell'edilizia ha risposto, alle problematiche introdotte dal concetto di sostenibilità, principalmente nell'efficientamento energetico degli edifici esistenti e nella progettazione di edifici nuovi sempre più energeticamente efficienti, rimanendo al passo con le novità in termini normativi. Il risultato è che ci si è preoccupati dell'*efficienza* (riduzione percentuale dei consumi) dei singoli edifici e poco dell'*efficacia* (riduzione del valore assoluto dei consumi) delle misure intraprese, cosa che ha portato a non avere sostanziali miglioramenti nonostante la forte spinta all'innovazione tecnologica. Dunque, la domanda che ci si pone è: gli obiettivi da perseguire per la realizzazione di un mondo più sostenibile, piuttosto chiari a livello teorico, sono stati tradotti coerentemente a livello pratico? Esistono altri scenari possibili che non sono ancora stati valutati?

CRITICITA'

I CAMBIAMENTI CLIMATICI E GLI IMPATTI DEL SETTORE EDILE

Quando si parla di cambiamenti climatici generalmente ci si riferisce al fenomeno conosciuto come 'riscaldamento globale', intendendo l'odierna fase di riscaldamento del clima terrestre iniziata e sviluppatasi nel corso del XX secolo, ricollegabile alle emissioni umane in atmosfera di crescenti quantità di anidride carbonica e di altri gas serra. Assunto come punto di riferimento il legame tra emissioni di anidride carbonica e aumento delle temperature, per limitare i possibili effetti negativi dei cambiamenti climatici, la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, UNFCCC, ha stabilito l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura media globale rispetto al periodo preindustriale al di sotto dei 2°C.

La decisione è supportata dagli allarmanti dati forniti dal secondo rapporto del Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC del 2007, secondo il quale la temperatura media della superficie terrestre è aumentata di $0,74 \pm 0,18$ °C durante il XX secolo a causa dell'incremento della concentrazione atmosferica dei gas serra in particolare dell'anidride carbonica. L'aumento delle temperature sarebbe la causa di fenomeni meteorologici sempre più estremi, l'innalzamento del livello del mare, la diminuzione del ghiaccio Artico, l'incremento di incendi boschivi, la perdita di biodiversità, il calo di produttività delle coltivazioni. [1]

Oggi la Commissione europea, attraverso il 2030 Climate Target Plan [2], pone il nostro continente su un percorso sostenibile per il conseguimento della riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, del 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990, e il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. I gas a effetto serra sono infatti la causa principale dei cambiamenti climatici. La concentrazione crescente nell'atmosfera di sostanze inquinanti come anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O), clorofluorocarburi (CFC), perfluorocarburi (PCF) ed esafluoruro di zolfo (SF₆), produce un effetto di riscaldamento della superficie terrestre e della parte più bassa dell'atmosfera. [3]

Conseguire gli obiettivi prefissati dal Climate Target Plan migliorerebbe il benessere dei cittadini dell'UE, apportando benefici in termini di salute, migliore qualità dell'aria, riduzione del degrado ambientale e, inoltre, sosterebbe fortemente la ripresa dopo la pandemia. Secondo le stime, in seguito alla chiusura delle centrali a carbone e al risanamento dell'industria ad alta intensità energetica, nel 2019 le emissioni di gas a effetto serra sono diminuite del 25% rispetto ai livelli del 1990. La Commissione propone però di modificare l'attuale traiettoria, in quanto le proiezioni indicano che se ci si limita ad applicare la legislazione in vigore, entro il 2050 l'UE riuscirebbe a conseguire una riduzione del 60% delle emissioni ma non riuscirebbe a raggiungere la neutralità climatica. Gli effetti provocati da un mancato cambio di passo sono evidenziati da proiezioni e simulazioni climatiche ad alta risoluzione, ottenute attraverso l'utilizzo di modelli climatici. I modelli climatici si basano sul presupposto che le condizioni climatiche future dipendano dall'evoluzione in atmosfera delle concentrazioni di gas climalteranti, le quali dipendono a loro volta dall'attuazione o meno di politiche di mitigazione, ossia di riduzione delle emissioni di tali gas.

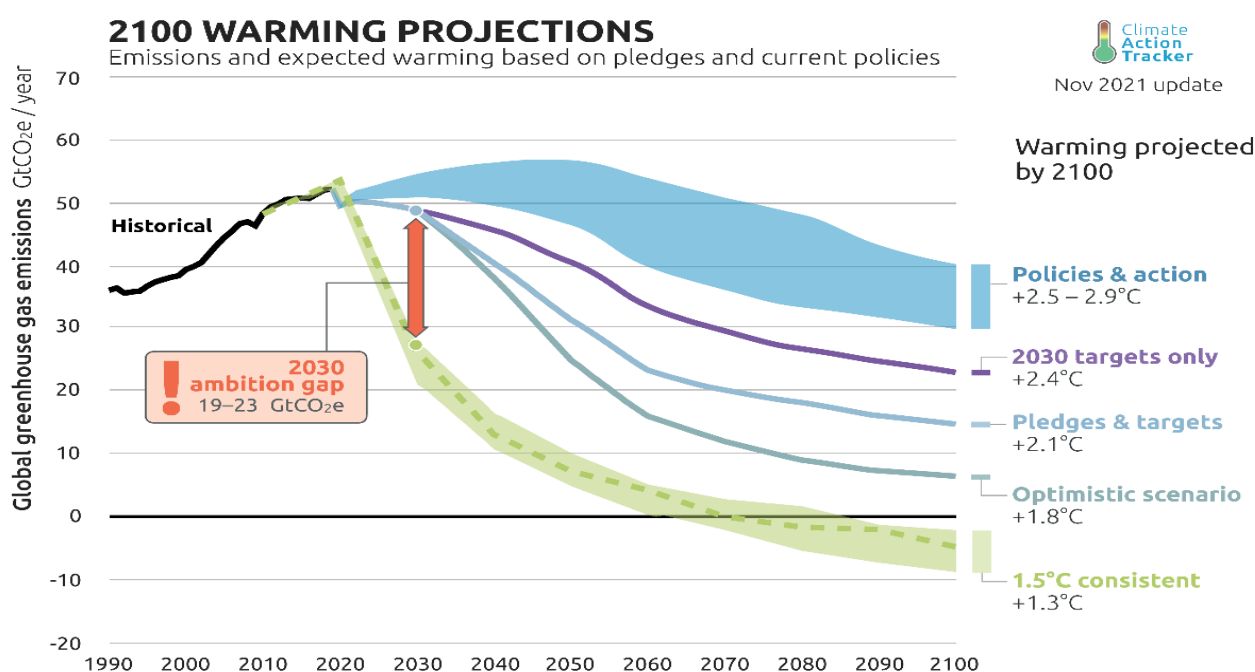


FIG.2 EMISSIONI E RISCALDAMENTO ATTESO BASATO SULLE ATTUALI POLITICHE (FONTE: THE CLIMATE ACTION TRACKER)

L'invasione dell'Ucraina da parte della Russia ha aggiunto nuova urgenza all'azione europea per il clima. L'UE si trova ora a un punto di svolta in termini di politica energetica e climatica: può sostituire la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili dalla Russia con una nuova dipendenza da altri Paesi, oppure intraprendere un'azione decisiva e passare a fonti energetiche rinnovabili nazionali. Il piano REPowerEU, presentato dalla Commissione europea il 18 maggio 2022, rappresenta un passo nella giusta direzione. Il piano include una proposta per aumentare la quota delle rinnovabili nell'energia finale nel 2030 dal 40% al 45% e per ridurre il consumo finale di energia a 750 Mtep invece dei 787 Mtep inclusi nel pacchetto "Fit for 55" a partire da luglio 2021. Complessivamente, a seconda dei cambiamenti nel mix energetico e del potenziale passaggio dal gas al carbone, ciò comporterebbe una riduzione delle emissioni tra il 57 e il 58% rispetto ai livelli del 1990, escludendo le attività LULUCF (Land use, land-use change, and forestry) e allontanando l'UE di circa il 4-5% dalla compatibilità con l'Accordo di Parigi, se integrato con un sostanziale aumento dei finanziamenti internazionali per il clima. Le riduzioni delle emissioni includendo le attività LULUCF sarebbero tra il 60 e il 62%. Per facilitare l'azione globale sul clima, l'UE dovrebbe quantificare i nuovi obiettivi in termini di riduzione delle emissioni e presentare un nuovo NDC

(Nationally Determined Contributions) prima della COP27. Sebbene il piano REPowerEU offra numerosi elementi che ridurrebbero la dipendenza energetica e le emissioni dell'UE, l'aumento degli investimenti nel gas fossile e la proposta di un passaggio limitato dal gas al carbone rappresentano una grave minaccia per le ambizioni climatiche dell'UE. L'UE dovrebbe invece accelerare ulteriormente la sua decarbonizzazione per eliminare la sua dipendenza dai combustibili fossili importati. L'aumento dell'obiettivo delle energie rinnovabili ad almeno il 50% e la riduzione del consumo finale di energia a non più di 700 Mtep nel 2030 dovrebbero essere i punti di partenza dei negoziati tra il Consiglio e il Parlamento europeo. [4]

Il CAT giudica "Insufficienti" gli obiettivi, le politiche e i finanziamenti dell'UE in materia di clima. La valutazione "Insufficiente" indica che le politiche e gli impegni dell'UE in materia di clima necessitano di miglioramenti sostanziali per essere coerenti con il limite di temperatura di 1,5°C previsto dall'Accordo di Parigi. L'obiettivo di riduzione delle emissioni dell'UE per il 2030, le sue politiche e le sue azioni sono coerenti con un riscaldamento di 2°C rispetto ai percorsi nazionali modellati. Inoltre, l'UE non sta rispettando il suo contributo equo all'azione per il clima.

Per migliorare il suo rating, l'UE dovrebbe rafforzare il suo obiettivo di riduzione delle emissioni portandolo ad almeno il 62% (escluse le attività LULUCF) rispetto ai livelli del 1990, adottare le politiche necessarie per raggiungere questo obiettivo e aumentare significativamente il suo sostegno all'azione per il clima nei Paesi in via di sviluppo e in quelli meno sviluppati. Nell'aprile 2021, l'Unione europea ha raggiunto un accordo sulla sua legge sul clima, che sancisce l'obiettivo di raggiungere collettivamente la "neutralità climatica entro il 2050". Secondo i modelli dell'UE, entro tale data le emissioni dell'UE diminuiranno tra 23-25 MtCO_{2e}. La copertura delle emissioni copre tutte le emissioni di GHG e tutti i settori dell'economia.

Il settore dell'edilizia e delle costruzioni rappresenta il principale responsabile delle emissioni di gas a effetto serra e del consumo di energia. Nel 2018 il settore dell'edilizia e delle costruzioni ha emesso il 39% delle emissioni globali di gas ad effetto serra [5], di cui il 28% legato a consumi energetici degli edifici (Residential direct/indirect, Non-residential direct/indirect) mentre il restante 11% è legato alla produzione di materiali da costruzione (Construction industry). L'elevata percentuale di emissioni legate ai consumi energetici degli edifici (28%) deriva dall'elevata domanda di energia, la quale viene soddisfatta per il 70% da fonti non rinnovabili (combustibili fossili).

Nel 2018 il settore dell'edilizia e delle costruzioni ha rappresentato il 36% dell'uso finale di energia [5], di cui il 30% è legato a consumi energetici degli edifici (Residential, Non-residential) mentre il restante 6% è legato alla produzione di materiali da costruzione (Construction industry). La quota maggiore è dovuta al consumo di elettricità, generata principalmente da combustibili fossili, il cui utilizzo è aumentato di oltre il 19% dal 2010.

A livello globale, il maggiore consumo di elettricità è legato al raffreddamento degli ambienti, la cui domanda è aumentata del 33% durante il periodo 2010-2018. È necessaria quindi una de-carbonizzazione dell'approvvigionamento elettrico ed un aumento della quota di energie rinnovabili (solare, eolico, biomassa). Già nel periodo 2010 – 2018 si è verificata una diminuzione dell'uso del carbone, di quasi il 10% a livello globale, grazie ad un aumento dell'8% dell'uso di gas naturale. Il più recente Report Global Alliance for Buildings and Construction 2021 ha riportato che il settore dell'edilizia e delle costruzioni ha emesso 37% delle emissioni globali di gas ad effetto serra; questo leggerissimo calo, rispetto al report del 2018, però non è dovuto agli sforzi per decarbonizzare il settore, piuttosto è in gran parte dovuto a blocchi e rallentamento delle economie di questi ultimi anni a seguito della pandemia e della situazione socio-politica internazionale [6].

Gli impatti ambientali sono da considerarsi anche legati alla produzione stessa dei materiali da costruzione, compreso i processi relativi al loro smaltimento. In tal senso, il settore delle

costruzioni è uno dei principali consumatori di risorse come acqua, suolo, vegetazione ma anche risorse minerarie.

Secondo uno studio commissionato dal Programma ambientale dell'Onu (Unep), negli ultimi quarant'anni l'estrazione di materie prime dalla Terra è triplicata passando da 22 miliardi di tonnellate nel 1970 a 70 miliardi di tonnellate nel 2010. Se i consumi continueranno a crescere al ritmo annuale, entro il 2050 il prelievo di risorse naturali è destinato a triplicare intensificando l'inquinamento, i cambiamenti climatici, la produzione di rifiuti e l'erosione del suolo e dei bacini d'acqua.

Per rispondere alle esigenze di 9 miliardi di abitanti serviranno 180 miliardi di tonnellate di materiale ogni giorno. I paesi più ricchi consumano in media dieci volte più materiale dei paesi più poveri, e il doppio della media mondiale. Nel mondo l'utilizzazione di materie prime è aumentata drasticamente dopo gli anni duemila, quando economie emergenti come quella cinese hanno utilizzato quantità sempre maggiori di ferro, acciaio, cemento, energia e di altri materiali per costruzioni. Questa situazione estremamente allarmante a livello ambientale, in futuro comporterà anche un aumento dei rischi di conflitti locali, come quelli che già stanno scoppiando nelle zone dove il settore minerario è in diretta concorrenza con l'agricoltura o lo sviluppo urbano.

Anche laddove esiste un forte impegno politico per un'economia circolare, come nell'UE e in altri Paesi dell'Europa occidentale, la quantità di rifiuti prodotti continua a crescere. I tassi di riciclaggio differiscono notevolmente tra i Paesi e sono particolarmente bassi nell'Europa orientale e nell'Asia centrale. I Governi invitano a intensificare la prevenzione dei rifiuti durante le fasi di produzione, consumo e riparazione, come la riprogettazione e la rigenerazione, anche attraverso incentivi, premialità e sgravi fiscali.

GPP, NORMATIVA ITALIANA CAM EDILIZIA E PROTOCOLLI DI SOSTENIBILITA': criticità e sovrapposizioni

Tra le cause scatenanti l'esigenza di un cambio di rotta verso un'edilizia più green vi è l'ingente produzione di gas climalteranti a livello urbano e di rifiuti, fenomeni molto più consistenti che in altri settori. Il Green Public Procurement o GPP, è definito dalla Commissione Europea, come *"l'approccio in base al quale le Amministrazioni Pubbliche integrano i criteri ambientali in tutte le fasi del processo di acquisto, incoraggiando la diffusione di tecnologie ambientali e lo sviluppo di prodotti validi sotto il profilo ambientale, attraverso la ricerca e la scelta dei risultati e delle soluzioni che hanno il minore impatto possibile sull'ambiente lungo l'intero ciclo di vita."* [7] La Commissione Europea, con una serie di provvedimenti ad hoc, ha prima incoraggiato gli Stati membri a dotarsi di piani d'azione accessibili al pubblico per l'integrazione delle esigenze ambientali negli appalti pubblici e, successivamente, ha emanato Linee Guida specifiche per la redazione dei Piani d'Azione Nazionali sul GPP. L'adozione italiana del GPP entra nel vivo con l'approvazione del decreto interministeriale del 11 aprile 2008, che ha stabilito la messa a punto del Piano Nazionale d'Azione per il Green Public Procurement. Il PAN GPP è un piano d'azione, per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione, predisposto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare- di concerto con i Ministri dell'Economia e Finanze e dello Sviluppo Economico.

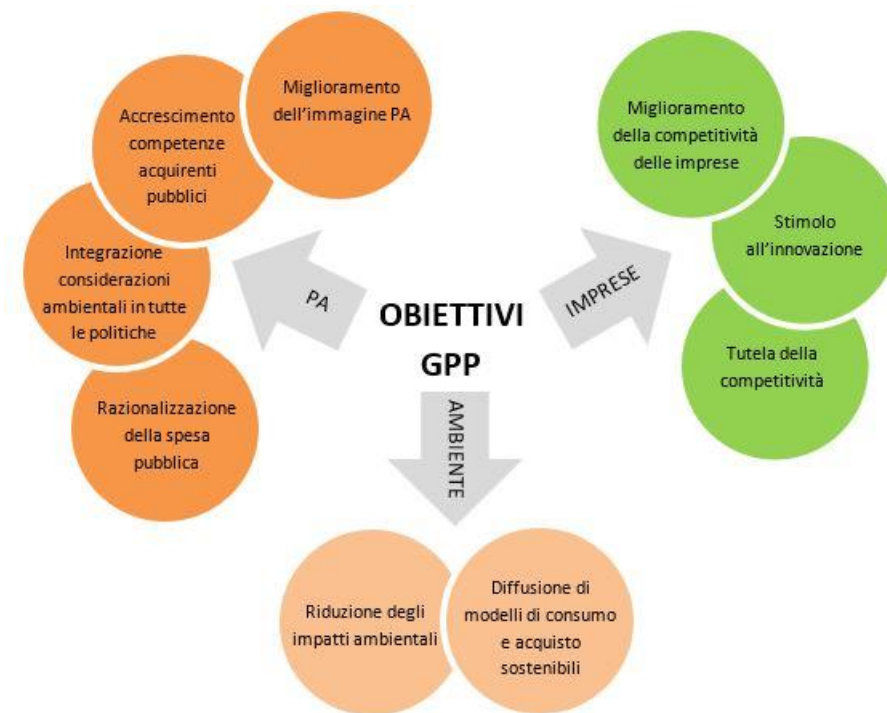


FIG.3 SCHEMA DEGLI OBIETTIVI DEL GPP

Esso prevede l'adozione dei criteri ambientali minimi (CAM) allo scopo di conseguire gli obiettivi ambientali strategici di riferimento, quali l'efficienza e il risparmio di risorse naturali, la riduzione dei rifiuti prodotti e della loro pericolosità e la riduzione dell'emissione di sostanze pericolose.



FIG.4 SCHEMA RIASSUNTIVO NASCITA DEI CAM CRITERI AMBIENTALI MINIMI

Il correttivo al codice degli appalti (D.Lgs. n° 57 del 2017) pubblicato nella GURI n° 103 del 05.05.2017 estende l'obbligo di inserire i Criteri Minimi Ambientali nella documentazione progettuale e di gara all'intero valore delle gare e a tutte le tipologie di appalti. Le novità di maggior interesse riguardano l'Art. 34 (Criteri di sostenibilità energetica e ambientale). Nel testo viene introdotto l'obbligo di applicazione dei Criteri Ambientali Minimi a tutte le categorie e per l'intero importo, con conseguente soppressione della percentuale di applicazione dei CAM sulle diverse categorie di appalto (calcolata come una percentuale del valore a base d'asta). I criteri ambientali si definiscono "minimi" in quanto elementi "di base" di qualificazione delle iniziative preferibili in termini di impatto ambientale, e costituiscono la dotazione minima di specifiche tecniche da inserire nella documentazione progettuale e di gara. Il loro scopo è sollecitare un'adeguata risposta ambientale da parte del mercato, in risposta alle richieste delle stazioni appaltanti. I CAM si suddividono in criteri ambientali di base e premianti. In particolare, questi ultimi prevedono l'assegnazione di

punteggi addizionali, proporzionali al numero di criteri di base per cui è prevista una prestazione ambientale superiore rispetto a quella prevista nei criteri di base. Tale previsione, tra l'altro, è indicata tra i criteri premianti per la definizione dei punteggi, ai fini dell'applicazione dell'offerta economicamente più vantaggiosa (OEPV art.95) [8]. Le stazioni appaltanti, nel rispetto dei principi di trasparenza, di non discriminazione e di parità di trattamento, procedono all'aggiudicazione degli appalti e all'affidamento dei concorsi di progettazione e dei concorsi di idee, sulla base del criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, individuata sulla base del miglior rapporto qualità/prezzo, seguendo un criterio di comparazione costo/efficacia quale il costo del ciclo di vita (art. 96, DLgs 50/2016). I costi legati al ciclo di vita di un prodotto, di un servizio o di un lavoro, comprendono: costi relativi all'acquisizione delle risorse; costi connessi all'utilizzo, quali consumo di energia e altre risorse; costi di manutenzione; costi relativi al fine vita, come i costi di raccolta, di smaltimento e di riciclaggio. Rientrano nell'LCA anche i costi imputati a esternalità ambientali legate ai prodotti, servizi o lavori nel corso del ciclo di vita, purché il loro valore monetario possa essere determinato e verificato. Tali costi possono includere i costi delle emissioni di gas a effetto serra e di altre sostanze inquinanti, nonché altri costi legati all'attenuazione dei cambiamenti climatici. I CAM includono disciplinari per le verifiche nelle quali vengono fornite indicazioni per dimostrare la conformità ai requisiti prescritti. A livello pratico sono proprio tali metodi di verifica a rendere complessa e difficoltosa l'applicazione dei CAM, dal momento che, implicitamente, sono richieste alle stazioni appaltanti e agli operatori economici competenze tecniche e giuridiche specialistiche non sempre alla portata di tutti. Queste difficoltà si vanno a sommare con la loro obbligatorietà nell'attuazione durante la partecipazione ad un bando di gara.

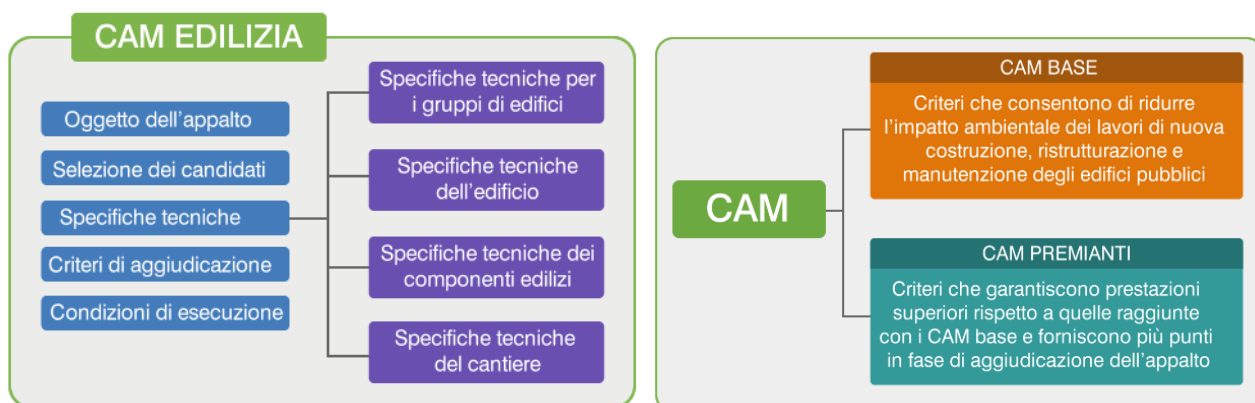


FIG.5 SCHEMA DELLA STRUTTURA DEI CAM EDILIZIA

Dunque, se da un lato i CAM sono di natura obbligatoria, su un altro fronte si posizionano le certificazioni ambientali, in quanto, queste ultime si applicano su base volontaria con lo scopo di misurare la sostenibilità di un determinato edificio. Le certificazioni ambientali si sono sviluppate inizialmente nei paesi anglosassoni per poi estendersi a livello mondiale, con l'intento di valutare l'impatto ambientale di un edificio lungo il suo intero ciclo di vita. Essendo non obbligatori, non sono di conseguenza vincolate ad un sistema di controllo unificato, ma a diversi enti patrocinatori che si occupano della corretta applicazione della certificazione. Ne consegue così la necessità di scegliere l'ente preposto a cui affidarsi per la valutazione: avendo la possibilità di rivolgersi ad una vasta gamma di enti, sia pubblici che privati, è complesso individuare un univoco criterio di scelta. Un fattore spesso preponderante nella scelta dell'ente certificatore è quello economico, poiché la maggior parte delle certificazioni viene rilasciata attraverso un compenso. Nel caso le certificazioni ambientali venissero imposte a livello legislativo, come in realtà i Criteri Ambientali Minimi previsti dal Nuovo Codice degli Appalti impongono in Italia, si porrebbe la questione circa la

loro influenza sul progetto; è evidente che in tal caso già in fase progettuale si dovrebbero osservare una serie di vincoli necessari al conseguimento di un alto punteggio nella valutazione. In generale tutti i sistemi di certificazione ambientale si basano su parametri di valutazione, raggruppati in categorie, mediante i quali vengono attribuiti punteggi. I punteggi vengono calcolati mediante l'impiego di indicatori, per lo più di tipo quantitativo; talvolta, come nel caso del sistema Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), vengono richiesti dei prerequisiti. Le categorie hanno come tematiche principali l'impatto energetico, l'analisi del sito, l'impiego di materiali ecocompatibili, la gestione delle acque; ogni categoria ha un peso diverso sul punteggio finale, in base alla sua rilevanza. In generale viene prestata scarsa attenzione alla gestione dell'impatto di cantiere e alla dimensione urbanistica del progetto, che viene ridotta esclusivamente all'analisi della mobilità [9]. Alcune certificazioni adottano parametri diversi in base alla tipologia di edificio da certificare: edifici esistenti, di nuova costruzione oppure ristrutturazioni (LEED, BREAM e in Italia il Protocollo Itaca). Il LEED, vista la sua maggiore vocazione commerciale, ha sviluppato una vasta serie di protocolli specifici, come LEED for Healthcare per gli ospedali, LEED for Retail per negozi e centri commerciali. Alla fine dell'analisi viene attribuito un punteggio finale che può essere espresso in forma numerica, oppure attraverso una classificazione mediante livelli (come ad esempio nel LEED).

Sebbene in ritardo rispetto ad altri paesi europei, anche l'Italia ha avviato ricerche e sperimentazioni per la definizione di metodi per la valutazione dell'ecocompatibilità ambientale dei progetti edilizi. Infatti, le certificazioni ambientali sono utilizzate come requisiti per selezionare progetti nell'ambito di bandi pubblici o di affidamento di incarichi. In Italia la prima certificazione ambientale è stata CasaClima (KlimaHaus), una certificazione energetica e marchio di qualità, applicata in anticipo (a partire dal 2002), rispetto al recepimento italiano della Direttiva 2002/91/CE (2005). Gli strumenti attualmente più diffusi nel nostro paese sono il metodo denominato Protocollo Itaca, elaborato dal Comitato tecnico per l'edilizia sostenibile presso l'Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale (ITACA), un'associazione federale delle Regioni e Province Autonome, nata nel 1996, a partire dal 2001; il metodo SB100 promosso dall'Associazione Nazionale Architettura Bioecologica (ANAB); il metodo LEED Italia patrocinato dal Green Building Council Italia costituito nel gennaio del 2008 su iniziativa del Distretto Tecnologico Trentino (Habitech) di Rovereto; il Sistema INBAR rilasciato dall'Istituto Nazionale di Bioarchitettura®.

Il Protocollo ITACA, elaborato anch'esso sulle basi del sistema GBC, è un sistema modulare, adattabile al contesto geografico, basato su punteggi di valutazione (da -1 a +5), assegnati confrontando l'indicatore calcolato con i valori della scala di prestazione (benchmark), che consente di attribuire un punteggio di eco-sostenibilità agli edifici in modo univoco, attraverso una linea di riferimento basata su presupposti di: certezza scientifica, interesse pubblico e semplicità [10].

Il sistema di certificazione LEED è uno sistema applicato in oltre cento paesi nel mondo, sviluppato dall'USGBC. È articolato e adattabile ai differenti contesti e prevede formule differenziate in base alla destinazione d'uso dell'edificio: nuove costruzioni (New Construction and Major Renovation), ristrutturazioni (Refurbishment), piuttosto che per specifiche tipologie edilizie, come possono essere le scuole (School) o gli edifici commerciali (Retail). In Italia è previsto anche un protocollo specifico per l'ambito residenziale GBC Home, oltre che la versione LEED per nuove costruzioni. Il sistema è suddiviso in sei categorie, con prerequisiti prescrittivi obbligatori e performance ambientali: siti sostenibili, gestione efficiente dell'acqua, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità degli ambienti interni, progettazione e innovazione. Dalla somma dei singoli crediti di ciascuna categoria dipende il livello di certificazione ottenuto: certified (da 40 a 49 punti); silver (50-59); gold (60-79); platinum (oltre gli 80). Oltre ai protocolli dedicati alle nuove costruzioni, GBC Italia ha sviluppato

il protocollo GBC Historic building: una nuova area tematica che riguarda le ristrutturazioni di edifici storici.


La differenza principale tra Protocollo Itaca e LEED riguarda il fatto che il Protocollo Itaca è stato concepito per essere usato liberamente dai professionisti interessati, LEED invece è un marchio che appartiene a GBC e per ottenere una certificazione occorre rivolgersi a specialisti accreditati, che svolgono la certificazione dietro un compenso, in genere parametrato rispetto alle dimensioni dell'edificio. Il Protocollo Itaca è uno strumento adattato alle norme nazionali e alle direttive europee, mentre il sistema LEED fa riferimento a normative anglosassoni e statunitensi.



- **CAMPO DI APPLICAZIONE:** edifici per uffici, residenziali, commerciali, istituzionali, scolastici, di nuova costruzione o soggetti ad interventi di ristrutturazione e manutenzione - Internazionale
- **PUNTO DI FORZA:** struttura flessibile e adattabile a specifiche geografiche e normative locali
- **AREE DI PARTICOLARE INTERESSE:** utilizzo dell'LCA per la selezione dei materiali da costruzione - riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, soprattutto durante la fase operativa dell'edificio
- **CRITICITÀ:** mancanza di requisiti sull'utilizzo di materiali locali o regionali - **criticità superata dal LEED e dal Protocollo ITACA**



- **CAMPO DI APPLICAZIONE:** edifici per uffici, residenziali, commerciali, istituzionali, scolastici, di nuova costruzione o soggetti ad interventi di ristrutturazione e manutenzione - Internazionale
- **PUNTO DI FORZA:** struttura rigida ma allo stesso tempo in grado di valutare le prestazioni ambientali per ogni nazione, grazie alla sua praticità e funzionalità
- **AREE DI PARTICOLARE INTERESSE:** gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione - monitoraggio del corretto funzionamento delle apparecchiature presenti nell'edificio
- **CRITICITÀ:** le percentuali di materiale da riutilizzare fanno riferimento ai costi e non all'effettiva quantità di materiale - **criticità superata dal Protocollo ITACA**



- **CAMPO DI APPLICAZIONE:** edifici per uffici, residenziali, commerciali, istituzionali, scolastici, di nuova costruzione o soggetti ad interventi di ristrutturazione e manutenzione - Nazionale
- **PUNTO DI FORZA:** Struttura adattabile al contesto o al territorio sul quale si applica, attraverso protocolli di valutazione regionali che si adattano a profili climatici e a prassi costruttive diverse
- **AREE DI PARTICOLARE INTERESSE:** attuazione di strategie volte alla massimizzazione di elementi smontabili e riutilizzabili - installazione di impianti domotici
- **CRITICITÀ:** mancanza di una valutazione di insieme delle prestazioni energetiche dell'edificio - **criticità superata dal BREEAM e dal LEED**

FIG.6 SCHEMA RIASSUNTIVO E ANALITICO DEI PRINCIPALI SISTEMI DI CERTIFICAZIONE AMBIENTALE

I protocolli di sostenibilità energetica ed ambientale risultano essere dei documenti utili nel semplificare e standardizzare i processi per l'inserimento del CAM Edilizia [11] nei progetti e nelle gare d'appalto, e per la verifica dei requisiti/criteri. Tra i protocolli ritenuti validi dalla normativa troviamo: ITACA, LEED, BREEAM, WELL, etc. Tuttavia, la semplice adozione del protocollo non è sufficiente al soddisfacimento dei criteri CAM, dovendosi effettuare la verifica di conformità del singolo criterio, in presenza di tutti i requisiti riferibili alle prestazioni ambientali richiamate nel singolo criterio. Interessante anche la FAQ relativa all'articolo 2.5.3, dove si evidenzia che, nel caso in cui il progetto sia sottoposto ad una fase di verifica valida per la successiva certificazione dell'edificio secondo uno dei protocolli di sostenibilità energetica-ambientale degli edifici (rating systems) di livello nazionale o internazionale, se i criteri previsti dal protocollo scelto rispondono ai criteri ambientali previsti dal

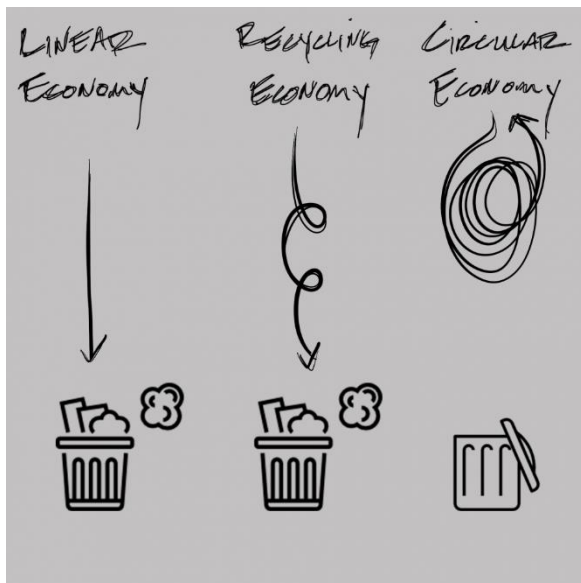
criterio 2.5.3, allora il progettista può presentare la documentazione prevista dal protocollo e non dover relazionare tutto quanto previsto dal criterio. Questa operazione va fatta a monte, nella fase di elaborazione del progetto, quindi la stazione appaltante dovrà mettere e gara lavori su un progetto esecutivo che avrà già specificato la documentazione da produrre a dimostrazione della conformità al criterio 2.5.3. Non è quindi responsabilità dell'offerente che dovrà basarsi su quanto previsto dal progetto esecutivo.

STRUMENTI E INDICATORI VALUTABILI

ECONOMIA CIRCOLARE: ciclo di vita dell'edificio e il Life Cycle Assessment

L'obiettivo per uno sviluppo sostenibile è garantire il progresso sociale, lo sviluppo economico e la protezione dell'ambiente, nonché un'equità di accesso alle risorse per le future generazioni, come previsto anche dall'Agenda2030 [12]. Il settore delle costruzioni riveste una grande responsabilità nel perseguire tale obiettivo perché sfrutta una notevole quantità di materie prime e di energia durante tutte le fasi del ciclo di vita del processo costruttivo: produzione, costruzione, uso, manutenzione fino alla demolizione. Un andamento di vita di tipo lineare è alla base dell'eco-efficienza. L'eco-efficienza è un concetto molto ampio che è stato definito per la prima volta nel 1992 dal World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) come «filosofia gestionale che incoraggia le imprese a cercare miglioramenti sul piano dell'impatto ambientale che fruttino paralleli vantaggi economici» ed è perseguibile «mediante la fornitura di beni e servizi a prezzi competitivi che soddisfano i bisogni umani e apportano qualità della vita, riducendo progressivamente gli impatti ecologici e l'intensità delle risorse durante tutto il ciclo di vita a un livello almeno in linea con la capacità di carico della terra» [13]. Il nucleo dell'eco-efficienza può essere inteso come "ottenere di più con meno", cioè più valore del prodotto o del servizio con meno sprechi, meno uso di risorse o meno tossicità. Le strategie per generare una maggiore riciclabilità e una maggiore durata del prodotto cercano di allontanare il momento in cui la risorsa diventa rifiuto, anche se la maggioranza del riciclaggio in realtà costituisce down-cycling rendendo i materiali adatti all'uso solo in applicazioni di valore inferiore. È logico invece preferire un approccio circolare. Vediamo insieme i benefici alla base della cosiddetta economia circolare. Il concetto di circolarità viene adoperato per la prima volta nel 1971 nel lavoro *The Closing Circle* del biologo statunitense Barry Commoner [14], all'interno del quale si evidenzia come i sistemi politici, economici e sociali abbiano creato la crisi ambientale ed energetica. L'autore chiede all'azione sociale di chiudere il cerchio della vita, in modo che possiamo "restituire alla natura la ricchezza che prendiamo in prestito". La chiusura del cerchio si concretizza con il reimmettere nel sistema, mediante operazioni di riciclaggio, prodotti che altrimenti arriverebbero a fine vita, riducendo al massimo gli sprechi. Questo processo, caratterizzato da un andamento circolare è chiamato *Cradle to Cradle* (C2C), ovvero dalla culla alla culla. In contrasto con l'eco-efficienza, che promuove un approccio dalla culla alla tomba, l'eco-efficacia è emblematica dell'economia circolare e promuove un approccio dalla culla alla culla, va oltre gli approcci a emissioni zero concentrandosi sullo sviluppo di prodotti e sistemi industriali che migliorano la qualità e la produttività dei materiali attraverso i successivi cicli di vita. L'obiettivo dell'eco-efficacia non è ridurre al minimo il flusso di materiali dalla culla alla tomba, quanto piuttosto generare metabolismi ciclici dalla culla alla culla, in grado di consentire ai materiali di mantenere il loro status di risorse e accumulare intelligenza nel tempo (upcycling) [15].

Estremamente coerente con quanto già scritto risulta essere la definizione di economia circolare che ha dato la Fondazione Ellen MacArthur: "... è un sistema industriale che è restaurativo o rigenerativo per intenzione e progettazione. Sostituisce il concetto di fine vita con quello di ripristino, si orienta verso l'uso di energie rinnovabili, elimina l'uso di sostanze chimiche tossiche, che impediscono il riutilizzo, e punta all'eliminazione dei rifiuti attraverso



una progettazione superiore di materiali, prodotti, sistemi e, all'interno di questi, modelli di business".

L'analisi del ciclo di vita (LCA: life cycle assessment) è un metodo strutturato e standardizzato a livello internazionale che permette di quantificare i potenziali impatti sull'ambiente e sulla salute umana associati a un bene o servizio, a partire dal rispettivo consumo di risorse e dalle emissioni [16]. Nella sua concezione tradizionale, considera l'intero ciclo di vita del sistema oggetto di analisi a partire dall'acquisizione delle materie prime sino alla gestione al termine della vita utile includendo le fasi di fabbricazione, distribuzione e utilizzo.

FIG.7 SCHEMA DEL PASSAGGIO DA UNA ECONOMIA LINEARE AD UNA CIRCOLARE

VALUTARE LA SOSTENIBILITÀ ATTRAVERSO GLI INDICATORI

A partire dalla Conferenza di Rio de Janeiro del 1992 si sono attivati una serie di processi volti a stimolare politiche condivise dai Paesi coinvolti, finalizzate al conseguimento dei principi promossi dallo sviluppo sostenibile. Alcuni esiti di queste politiche si sono concretizzati in convenzioni internazionali, leggi e normative internazionali e nazionali, a loro volta atti a stimolare un numero sempre crescente di report sullo stato ambientale. Lo sviluppo sostenibile ha portato pertanto all'elaborazione di metodologie e quadri culturali di riferimento per elaborare dei sistemi di valutazione dell'ambiente e dello sviluppo. All'interno di questo processo giocano un ruolo fondamentale gli indicatori di sostenibilità, che risultano essere un mezzo fondamentale per la comparazione di diverse situazioni o processi. L'indicatore viene definito come un parametro o un valore derivato da parametri, che fornisce informazioni su un determinato fenomeno, possedendo quindi un significato che supera le proprietà del singolo parametro. Da ciò si deduce che un indicatore ha la caratteristica di sintetizzare diversi parametri in base all'ambito specifico per cui è pensato, riducendo la vastità dei dati. Oltre a questa funzione riassuntiva, l'indicatore ha il compito di semplificare la comunicazione degli esiti delle analisi nei confronti degli utenti. Un buon indicatore, perciò, è riconoscibile dalla comunità, deve essere comprensibile da parte degli utenti e deve avere caratteristiche il più possibile oggettive: inteso come strumento fatto per rivolgersi a tutti, ha il compito di incentivare la partecipazione e la collettivizzazione delle informazioni. Questo permette una sua comparazione con altre esperienze e una valutazione misurabile a livello quantitativo, portando alla luce un dato oggettivo difendibile e scientificamente attendibile. L'obiettivo dell'indicatore è generalmente costituito dallo scopo in relazione al quale è stato ideato, questo si potrebbe identificare come un 'primo livello' dell'obiettivo dell'indicatore; un 'secondo livello' è determinato dalla componente specifica dello sviluppo sostenibile (ambientale, sociale, economica) al quale l'indicatore si rivolge; a loro volta i singoli obiettivi che si ritrovano all'interno di una componente specifica dello sviluppo sostenibile costituiscono un 'terzo livello'. Per quello che riguarda invece le funzioni, si possono riscontrare tre funzioni principali: una funzione ricognitiva, se vengono impiegati per il monitoraggio di processi, una funzione valutativa quando esprimono un giudizio di valore su un determinato processo, una funzione orientativa quando forniscono indicazioni su quali strategie intraprendere (Vallega 2008). È interessante sottolineare come nella grande maggioranza dei casi gli indicatori della sostenibilità mettano in relazione le azioni umane con la produzione di anidride carbonica. Questo avviene poiché i cambiamenti climatici

vengono correlati ad una produzione eccessiva di CO₂ [17]. Oltre al principale gas serra prodotto dall'uomo, il biossido di carbonio (CO₂), esistono altri gas serra, tra cui il metano e il protossido di azoto. I diversi gas non contribuiscono in egual misura all'effetto serra e rimangono nell'atmosfera per periodi diversi. Per poter confrontare l'effetto dei diversi gas serra, il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ha definito il cosiddetto «potenziale di riscaldamento globale» (Global Warming Potential). Questo indice esprime l'effetto del riscaldamento di una determinata quantità di un gas serra in un periodo definito (per lo più 100 anni) rispetto a quello del CO₂. Il metano, per esempio, ha un impatto climatico 28 volte superiore rispetto al CO₂, ma rimane nell'atmosfera meno a lungo. L'effetto sul clima del protossido di azoto supera quello del CO₂ di quasi 300 volte. Entrambi questi gas serra hanno la loro fonte antropica nell'agricoltura, a causa dell'utilizzo dei fertilizzanti azotati e dell'allevamento. Le emissioni di gas serra possono pertanto essere convertite in CO₂ equivalenti e quindi raggruppate [18]. I CO₂ equivalenti vengono definiti con l'abbreviazione «CO_{2e}».

STATO DELL'ARTE

È necessario effettuare una valutazione sistematica e quantitativa dell'evoluzione scientifica della letteratura che fa riferimento alla teoria e alla pratica delle strategie di mitigazione degli impatti ambientali relative alle singole fasi del ciclo di vita di un edificio (con particolare interesse all'indicatore ambientale Embodied Carbon), da una prospettiva bibliometrica. Per contribuire a soddisfare questa limitazione, si intende rilevare le caratteristiche della letteratura mondiale inerenti alla decarbonizzazione delle fasi del ciclo di vita dell'edificio nel campo di interesse, ovvero l'edilizia e l'industria delle costruzioni. I risultati ottenuti potrebbero rivelarsi utili per la comunità accademica nell'identificare il trend di interesse negli ultimi anni, le carenze di informazioni relative alle singole fasi del ciclo di vita e le potenziali opportunità nelle attuali conoscenze e nell'individuazione del percorso da intraprendere per la presente ricerca.

Diversi sono i metodi di revisione esistenti per analizzare la letteratura presente: revisione critica, revisione della letteratura, metanalisi, ricerca sistematica e revisione [19]. La bibliometria, in quanto revisione quantitativa sistematica della letteratura, segue un metodo sistematico dettagliato e trasparente e, in particolar modo, segue un processo di revisione riproducibile per raccogliere e sistematizzare le informazioni. Questo metodo può essere utilizzato in particolare per la ricerca transdisciplinare per identificare le lacune geografiche, scalari, teoriche e metodologiche nella letteratura.

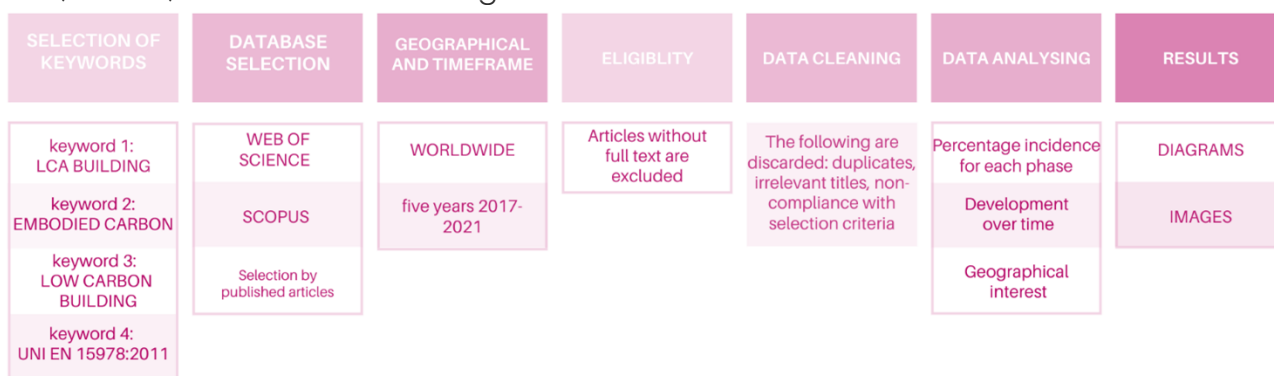


FIG.8 SCHEMA RIASSUNTIVO DELL'ARTICOLAZIONE DELLA METODOLOGIA APPLICATA PER LO STATO DELL'ARTE

La metodologia usata per compiere tale analisi di letteratura, in prima istanza, ha utilizzato quattro parole chiave: LCA BUILDING, EMBODIED CARBON, LOW CARBON BUILDING e UNI EN 15978:2011. Questi concetti risultano essere tra i più usati e menzionati sia tra le keywords che negli abstract introduttivi dei lavori inerenti tale tematica. Tali parole chiave sono state usate per filtrare gli articoli oggetto di analisi attraverso due database: Web of Science

(WoS) e Scopus, nell'arco temporale 2017 - 2021. I record sono raccolti da entrambi i database Web of Science (WoS) e Scopus, il che si traduce in una prospettiva globale più ampia dei dati bibliometrici [19]. Un primo goal di tale scelta è la rilevazione del volume di letteratura pubblicata nel campo di interesse presso i due database più influenti e quindi, comprensivi di un'area di indagine a livello mondiale. Dopo aver raccolto i record da entrambi i database, i risultati di categorie non pertinenti (ad esempio, fisica, economia, elettronica, ecc.) sono stati rimossi. Inoltre, attraverso una meticolosa analisi si è soprappiunti alla verifica della pertinenza dei risultati, con l'esclusione di alcuni documenti, ad esempio quelli relativi alle infrastrutture come strade, ponti, tunnel, ferrovie, aeroporti, ecc. Non sono state prese in considerazione le seguenti opere: duplicati, atti di convegni e simposi, documenti non disponibili e documenti il cui argomento principale non aggiunge valore al contenuto di questo lavoro.

Dunque, ricapitolando:

- la revisione deve essere specifico per il settore dell'edilizia;
- la revisione deve concentrarsi sugli impatti ambientali nell'ambiente costruito;
- la revisione può includere studi su interi edifici, elementi di costruzione, componenti edilizi o materiali da costruzione in legno;
- la revisione può includere studi sulle nuove costruzioni, ristrutturazioni, ampliamenti edifici ed altri interventi edilizi.

| ARTICLES | Product A1 - A3 | Construction A4 - A5 | Use Stage B1 - B5 | Operational Energy B6 | Operational Water B7 | End of life C1 - C4 | Benefits and Load D | Journal | Country |
|---------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------------------|
| Puettmann, M. et al. [20] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Freier Raine, D. et al. [21] | | | | | | | | Sustainability | UK, Cile |
| Lavercombe, A. et al. [22] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Chagganis, R. et al. [23] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Faridmehr, I. et al. [24] | | | | | | | | Sustainability | Russia, Canada, Iran |
| Hu, M. [25] | | | | | | | | Sustainability | USA, Polonia |
| Keskin, F.S. et al. [26] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Jankovic, L. et al. [27] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Kim, H.-S. et al. [28] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Ferreira, F.P.V. et al. [29] | | | | | | | | Sustainability | Brasile, UK |
| Dorsey, B. [30] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Nawarathna, A. et al. [31] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Lee, D. et al. [32] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Mercader-Moyano, P. et al. [33] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Chen, Z. et al. [34] | | | | | | | | Sustainability | Cina, USA |
| Hanafi, M. et al. [35] | | | | | | | | Sustainability | Turchia |
| Whitworth, A.H. et al. [36] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Almeida, M. et al. [37] | | | | | | | | Sustainability | Portogallo |
| Sicignano, E. et al. [38] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Kang, G. et al. [39] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| luorio, O. et al. [40] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Lee, D. et al. [41] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Paik, I. et al. [42] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Zaman, A.U. et al. [43] | | | | | | | | Sustainability | Australia, Nuova Zelanda |
| Melella, R. et al. [44] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Williamson, A. et al. [45] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Allan, K. et al. [46] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Bazzocchi, F. et al. [47] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Gajic, D. et al. [48] | | | | | | | | Sustainability | Bosnia Erzegovina, Slovenia |
| Payá, J. et al. [49] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Montana, F. et al. [50] | | | | | | | | Sustainability | Italia, Danimarca |
| Yin, X. et al. [51] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Trovato, M.R. et al. [52] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Lorenzo-Sáez, E. et al. [53] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Nakano, K. et al. [54] | | | | | | | | Sustainability | Giappone |
| Cheng, B. et al. [55] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Australia |
| Luo, X. et al. [56] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Iliescu, M. et al. [57] | | | | | | | | Sustainability | Romania |
| Duan, H. et al. [58] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Liu, H.-Y. [59] | | | | | | | | Sustainability | Taiwan |
| Lin, X. et al. [60] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Padilla-Rivera, A. et al. [61] | | | | | | | | Sustainability | Canada |
| Liang, Y. et al. [62] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Yan, X. et al. [63] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Hemmati, M. et al. [64] | | | | | | | | Sustainability | USA, Cina |
| Chen, C.X. et al. [65] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Gu, H. et al. [66] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Chen, C. et al. [67] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Singapore |
| Giaveno, S. et al. [68] | | | | | | | | Sustainability | Italia, Paesi Bassi |
| Kumar, A. et al. [69] | | | | | | | | Sustainability | India, Italia |

| | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|-------------------------------------|------------------------------|
| Mileto, C. et al. [70] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Carvalho, J.P. et al. [71] | | | | | | | | Sustainability | Portogallo, Brasile |
| Vázquez-Rowe, I. et al. [72] | | | | | | | | Sustainability | Perù |
| Mohebbi, G. et al. [73] | | | | | | | | Sustainability | UK |
| Baldoni, E. et al. [74] | | | | | | | | Sustainability | Italia, Spagna |
| Liang, S. et al. [75] | | | | | | | | Sustainability | USA |
| Dolezal, F. et al. [76] | | | | | | | | Sustainability | Austria |
| Giordano, R. et al. [77] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Del Rosario, P. et al. [78] | | | | | | | | Sustainability | Germania |
| Malabi Eberhardt, L.C. et al. [79] | | | | | | | | Sustainability | Danimarca, Paesi Bassi |
| Rajagopalan, N. et al. [80] | | | | | | | | Sustainability | Belgio |
| Bianchi, P.F. et al. [81] | | | | | | | | Sustainability | Brasile, Spagna |
| Baran, E. et al. [82] | | | | | | | | Sustainability | Polonia |
| Lee, S. et al. [83] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Kim, R. et al. [84] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Chandrasekaran, V. et al. [85] | | | | | | | | Sustainability | Lituania |
| Kanafani, K. et al. [86] | | | | | | | | Sustainability | Danimarca |
| Monzón-Chavarrías, M. et al. [87] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Abouhamad, M. et al. [88] | | | | | | | | Sustainability | Egitto |
| Vilčeková, S. et al. [89] | | | | | | | | Sustainability | Slovacchia |
| Caruso, M. et al. [90] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Václavík, V. et al. [91] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca, Slovacchia |
| Czernik, S. et al. [92] | | | | | | | | Sustainability | Polonia |
| Ayagapin, L. et al. [93] | | | | | | | | Sustainability | Francia |
| Sinka, M. et al. [94] | | | | | | | | Sustainability | Lettonia |
| Ženíšek, M. et al. [95] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca |
| Carvalho, J.P. et al. [96] | | | | | | | | Sustainability | Portogallo |
| Palumbo, E. et al. [97] | | | | | | | | Sustainability | Germania, Spagna |
| Veselka, J. et al. [98] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca |
| Hafner, A. et al. [99] | | | | | | | | Sustainability | Germania |
| Theißen, S. et al. [100] | | | | | | | | Sustainability | Germania |
| Mercader-Moyano, P. et al. [101] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Valencia-Barba, Y.E. et al. [102] | | | | | | | | Sustainability | Spagna, Messico |
| Kakkos, E. et al. [103] | | | | | | | | Sustainability | Svizzera, USA, Germania |
| Naneva, A. et al. [104] | | | | | | | | Sustainability | Svizzera, Svezia |
| Bertin, I. et al. [105] | | | | | | | | Sustainability | Francia |
| Schneider-Marin, P. et al. [106] | | | | | | | | Sustainability | Germania |
| Wang, N. et al. [107] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Norvegia, Regno Unito |
| Pešta, J. et al. [108] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca |
| Di Giuseppe, E. et al. [109] | | | | | | | | Sustainability | Italia, Danimarca, Svizzera |
| Cheng, B. et al. [110] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Australia |
| Xue, Z. et al. [111] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| Lu, K. et al. [112] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Australia |
| Pavlů, T. et al. [113] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca |
| Pálenský, D. et al. [114] | | | | | | | | Sustainability | Repubblica Ceca |
| Na, S. et al. [115] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Paik, I. et al. [116] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| van Loon, R.R.L. et al. [117] | | | | | | | | Sustainability | Paesi Bassi |
| Gámez-García, D.C. et al. [118] | | | | | | | | Sustainability | Spagna, Messico |
| Lozano-Miralles, J.A. et al. [119] | | | | | | | | Sustainability | Spagna |
| Nikolić Topalović, M. et al. [120] | | | | | | | | Sustainability | Serbia, Bosnia Erzegovina |
| Švajlenka, J. et al. [121] | | | | | | | | Sustainability | Slovacchia |
| Feng, K. et al. [122] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Svezia |
| Favi, C. et al. [123] | | | | | | | | Sustainability | Italia |
| Skaar, C. et al. [124] | | | | | | | | Sustainability | Norvegia |
| Roh, S. et al. [125] | | | | | | | | Sustainability | Corea |
| Gervasio, H. et al. [126] | | | | | | | | Sustainability | Portogallo, Italia |
| Dong, L. et al. [127] | | | | | | | | Sustainability | Cina, Canada, Australia |
| Akyüz, M.K. et al. [128] | | | | | | | | Sustainability | Turchia |
| Zhang, Y. [129] | | | | | | | | Sustainability | Cina |
| J. Moreno-Juez, Iñigo J. Vegas et al. [130] | | | | | | | | Construction and Building Materials | Spagna |
| Petri Sormunen et al. [131] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Finlandia |
| Jorge Fernandes et al. [132] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Portogallo |
| Khuram Rashid et al. [133] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Pakistan, USA |
| Xinyi Li et al. [134] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Cina, UK |
| Hui Li et al. [135] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Cina, Australia |
| Hoang Nguyen et al. [136] | | | | | | | | Construction and Building Materials | Finlandia, Belgio |
| Alexandra Charles et al. [137] | | | | | | | | Energy and Buildings | Portogallo |
| G.B.M.A. Litjens et al. [138] | | | | | | | | Energy and Buildings | Paesi Bassi |
| Kien T. Tong et al. [139] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Vietnam, UK |
| Sevket Can Bostanci et al. [140] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Turchia, UK |
| Bernardino D'Amico et al. [141] | | | | | | | | Energy and Buildings | UK |
| Adriana Souto-Martínez et al. [142] | | | | | | | | Energy and Buildings | USA |
| Peter Ylmén et al. [143] | | | | | | | | Energy and Buildings | UK |
| Jun Li et al. [144] | | | | | | | | Energy and Buildings | Cina, Australia |
| Francisca Molina-Moreno et al. [145] | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Spagna |
| K. Sartor et al. [146] | | | | | | | | Energy and Buildings | Belgio |
| Ali Amiri et al. [147] | | | | | | | | Energy and Buildings | Finlandia, Islanda |
| Peter Ylmén et al. [148] | | | | | | | | Building and Environment | Svezia |
| Eirik Resch et al. [149] | | | | | | | | Building and Environment | Norvegia, Danimarca |
| D. Muheise-Araalia et al. [150] | | | | | | | | Construction and Building Materials | Irlanda |
| Antti Kosonen et al. [151] | | | | | | | | Energy and Buildings | Finlandia |
| S. Muguda et al. [152] | | | | | | | | Construction and Building Materials | Regno Unito, Francia, Italia |
| Chiara Piccardo et al. [153] | | | | | | | | Energy and Buildings | Svezia |
| Paul Moran et al. [154] | | | | | | | | Energy and Buildings | Irlanda |
| Hoang Nguyen et al. [155] | | | | | | | | Materials and Design | Finlandia, Germania, Italia |
| Eirik Resch et al. [156] | | | | | | | | Building and Environment | Norvegia, Danimarca |
| Antonio Augusto Morini et al. [157] | | | | | | | | Materials and Design | Brasile, Portogallo |
| S. Eleftheriadis et al. [158] | | | | | | | | Energy and Buildings | Regno Unito |
| Claudio Nägeli et al. [159] | | | | | | | | Energy and Buildings | Svezia, Svizzera |
| S. Eleftheriadis et al. [160] | | | | | | | | Energy and Buildings | UK, Regno Unito |

| | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------------------------|
| A. Feehan et al. [161] | | | | | | | | | Journal of Building Engineering | Irlanda, Lussemburgo |
| Yovanna Elena Valencia-Barba et al. [162] | | | | | | | | | Journal of Building Engineering | Spagna, Messico |
| Mehrdad Rabani et al. [163] | | | | | | | | | Building and Environment | Norvegia |
| Morten Walbech Ryberg et al. [164] | | | | | | | | | Building and Environment | Danimarca |
| Stephen O. Amiandamhen et al. [165] | | | | | | | | | Construction and Building Materials | Svezia |
| C. Piccardo et al. [166] | | | | | | | | | Energy and Buildings | Svezia |
| Zaid Alwan et al. [167] | | | | | | | | | Journal of Building Engineering | UK, Regno Unito |
| Verena Göswein et al. [168] | | | | | | | | | Building and Environment | Svizzera, Portogallo, Italia |
| Peter Ylmén et al. [169] | | | | | | | | | Building and Environment | Svezia |
| C. Lausselet et al. [170] | | | | | | | | | Building and Environment | Norvegia |
| Chunbo Zhang et al. [171] | | | | | | | | | Journal of Building Engineering | Paesi Bassi, Cina |
| Dimitri Pinel et al. [172] | | | | | | | | | Building and Environment | Norvegia |
| Alina Galimshina et al. [173] | | | | | | | | | Building and Environment | Svizzera, Svezia |
| Helena Nydahl et al. [174] | | | | | | | | | Energy and Buildings | Svezia |
| Magnus Österbring et al. [175] | | | | | | | | | Energy and Buildings | Svezia |
| David Birge et al. [176] | | | | | | | | | Building and Environment | USA |
| Monica Lavagna et al. [177] | | | | | | | | | Building and Environment | Italia |
| A. Koezjakov et al. [178] | | | | | | | | | Energy and Buildings | Paesi Bassi, Ungheria |
| A.U. Din et al. [179] | | | | | | | | | Energy Procedia | UK |
| C. Galpin et al. [180] | | | | | | | | | Energy Procedia | UK |
| Mamo Fufa et al. [181] | | | | | | | | | Energy Procedia | Norvegia |
| Larissa Strömberg [182] | | | | | | | | | Procedia Engineering | Svezia |
| Claudio Favi et al. [183] | | | | | | | | | Energy Procedia | Italia |
| Robert H. Crawford et al. [184] | | | | | | | | | Procedia Engineering | Australia |
| Carolina Colli et al. [185] | | | | | | | | | Procedia CIRP | Francia |
| Bernardino D'Amico et al. [186] | | | | | | | | | Procedia CIRP | Regno Unito |
| Zahra Teshnizi et al. [187] | | | | | | | | | Procedia CIRP | Canada |
| Austin Himes et al. [188] | | | | | | | | | Developments in the Built Environment | USA |
| Hatice Sözer et al. [189] | | | | | | | | | Energy Reports | Turchia |
| Marta Gangolells et al. [190] | | | | | | | | | Sustainable cities and society | Spagna |
| Tajda Potrč Obrecht et al. [191] | | | | | | | | | Journal of Cleaner Production | Slovenia |
| A. van Stijn et al. [192] | | | | | | | | | Resources, Conservation and Recycling | Danimarca, Paesi Bassi |
| M.F.F. Menna Barreto et al. [193] | | | | | | | | | Cleaner Engineering and Technology | Brasile |
| Arnau González et al. [194] | | | | | | | | | Resources, Conservation & Recycling Advances | Spagna |
| Arian Loli et al. [195] | | | | | | | | | International Journal of Disaster Risk Reduction | Norvegia |
| Zaid Alwan et al. [196] | | | | | | | | | Journal of Building Engineering | UK |
| N. Ata-Ali et al. [197] | | | | | | | | | Resources, Conservation and Recycling | Spagna |

TAB. 1 TABELLA RIASSUNTIVA DEI CONTRIBUTI OGGETTO DELLA PRESENTE ANALISI

Gli aspetti analizzati sono: l'incidenza percentuale per ogni fase costituente LCA Building nel quinquennio in esame; l'andamento e lo sviluppo nel corso del quinquennio in esame e l'interesse territoriale nei confronti della tematica. A valle della metodologia di analisi sopra presentata, i contributi risultano essere 178 (tab.1).

INTERESSE TERRITORIALE

Nel quinquennio preso in considerazione: 2017-2021, diversi sono i paesi o regioni che hanno pubblicato studi e ricerche sull'argomento analizzato. Come mostrato nella Figura 7, la Cina ha contribuito maggiormente al corpo di ricerca. Risulta, dunque, come il primo paese al mondo a adottare una legislazione per lo sviluppo della Circular Economy [198], implementando e sviluppando i principali concetti e le più efficaci strategie di mitigazione e abbattimento delle emissioni per decenni, sia nel mondo accademico che in politica [199]. Tale interesse è collegato alle leggi, le politiche e i regolamenti dall'alto verso il basso [200], e in particolar modo è riscontrabile nelle politiche cinesi per l'economia circolare, negli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG), nelle serie di indicatori cinesi per il tredicesimo piano quinquennale (2015-2020) e nel Sistema di indicatori di sviluppo verde e sistema di obiettivi per la valutazione della costruzione della civiltà ecologica [201].



FIG. 9 E 10 MAPPA MONDIALE ED EUROPEA CHE MOSTRANO L'INTERESSE DELLA TEMATICA IN TERMINI DI VOLUME DI CONTRIBUTI

Altrettanto interessante l'elevato numero di pubblicazioni da parte dei paesi europei. Questa tendenza riflette la crescente consapevolezza della sostenibilità accumulata nel vecchio continente e la sua sensibilità in merito alla tematica ambientale, che è principalmente dovuta all'adozione della politica CE da parte dell'Unione Europea (UE), tra cui citiamo: il pacchetto sull'economia circolare “Verso un'economia circolare, un programma zero rifiuti per l'Europa” [202] e “Closing the Loop - Un piano d'azione dell'UE per l'economia circolare” [203]. Rilevante il contributo da parte del Regno Unito, il quale nel 2019 proclamava l'emergenza climatica, accelerando il cammino verso la propria svolta green: fu il primo Paese al mondo a farlo e ciò ha, di conseguenza, sensibilizzato i centri di ricerca, le istituzioni e il mondo accademico a formulare strategie efficaci e concrete. Diversi gli obiettivi posti sul tavolo di discussione: il raggiungimento del livello zero di emissioni nocive prima della data finora indicata (2030 invece che 2050), l'incremento delle fonti rinnovabili, ma anche progetti di economia verde e un taglio dei rifiuti, in quanto sulla base del secondo il rapporto Global Warming presentato a fine 2018 dal Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (Ipcc), se si dovesse continuare a emettere la stessa quantità di CO₂, l'aumento di temperatura del pianeta supererà il grado e mezzo proprio nel 2030. Nell'anno corrente, 2021, il Regno Unito accelera ulteriormente sull'obiettivo della decarbonizzazione, che diventa la riduzione delle emissioni nocive del 78% entro il 2035, [204] quindici anni prima del previsto. I nuovi obiettivi saranno stabiliti per legge e per la prima volta imporranno limiti anche al settore dei trasporti aerei, su strada e via nave. Anche l'Italia risulta essere sensibile alla tematica, in quanto diverse misure normative sono state attuate negli ultimi anni. In linea con gli obiettivi della Direttiva 2008/98/CE, il D.lgs. 50/2016 “Codice dei contratti pubblici” (modificato dal D.lgs. 56/2017) decreta l'obbligo da parte di tutte le stazioni appaltanti di attuare i Criteri ambientali minimi (CAM) previsti in fase di aggiudicazione dell'appalto attraverso il sistema dell'offerta economicamente più vantaggiosa. I CAM, contenuti in allegato al Decreto dell'11 ottobre 2017 [205], sono requisiti ambientali volti all'individuazione della migliore soluzione progettuale sotto il profilo ambientale, ad un uso efficiente delle risorse e alla promozione di un'economia circolare. Consentono alla stazione appaltante di ridurre gli impatti ambientali degli interventi di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione degli edifici, assicurando prestazioni ambientali al di sopra della media del settore. Inoltre, al fine di raggiungere gli obiettivi fissati dal Pacchetto energia pulita per tutti gli europei, gli Stati membri sono tenuti ad adottare Piani nazionali integrati per l'energia e il clima (PNIEC) per il periodo 2021 – 2030. L'Italia il 21 gennaio 2020 ha inviato alla Commissione europea il PNIEC [206], attraverso il quale ha stabilito gli obiettivi nazionali al 2030 sulla riduzione delle emissioni, sull'efficienza energetica e sulle fonti rinnovabili, delineando per ciascuno di essi le misure che saranno attuate per assicurarne il raggiungimento: la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 40% rispetto ai livelli del 1990; il raggiungimento di un risparmio dei consumi energetici primari del 43% rispetto ad uno scenario di riferimento (PRIMES 2007) e il raggiungimento di una quota del 30% di energie rinnovabili nel totale dei consumi energetici.

INTERESSE PER LE FASI

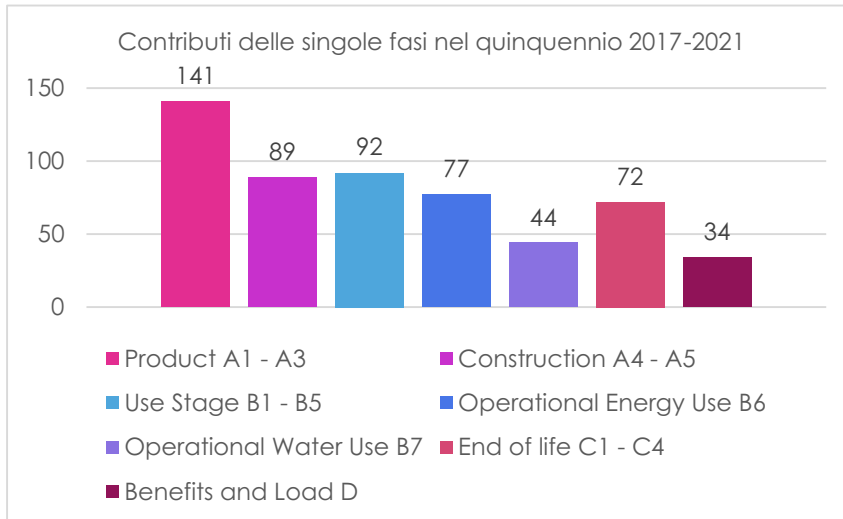


FIG. 11 ISTOGRAMMA CHE MOSTRA IL NUMERO DI CONTRIBUTI SULLA TEMATICA DELLE SINGOLE FASI (LCA) NEL QUINQUENNIO DI INTERESSE

In figura 11 è possibile vedere l'incidenza percentuale dei contributi afferenti alle singole fasi costituenti il Life cycle stages from BS EN 15978:2011 Sustainability of construction works, sul totale dei contributi presi in esame per questa revisione di letteratura. Si evince che la fase più ampiamente indagata risulta essere quella di produzione A1-A3, ovvero la prima del ciclo di vita dell'edificio, segue con 9 punti percentuali in meno la fase d'uso B1-B5.

Seguono le fasi A4-A5 (Construction), B6 (Operational Energy Use) e C1-C4, che si attestano rispettivamente a dei punteggi percentuali di 16%, 14% e 13%. Decisamente minori i punteggi percentuali ottenuti dalla fase B7 (Operational Water Use) in quanto particolarmente specifica e di settore e, infine, la fase finale del ciclo D (Benefits and Load). Il grande interesse per la fase di produzione è sicuramente da collegare all'esistenza di numerosi database ed inventari dei principali materiali usati nel settore delle costruzioni, tra cui l'EpiC database [207], sviluppato dall'università di Melbourne, il quale utilizza un approccio ibrido (patch exchange), per sviluppare i coefficienti energetici incorporati; l'INIES database [208] il quale si differenzia dall'"EpiC database", per l'assenza dei dati di default, infatti l'"INIES database" raccoglie soltanto i dati delle dichiarazioni ambientali di prodotto, senza applicare nessuna metodologia di selezione; ed infine, l'Inventory of carbon and energy (ICE), [209] elaborato dall'università di Bath ed in continuo aggiornamento. Largamente indagata risulta essere anche la fase operativa, in quanto, fino a qualche anno fa, l'energia operativa era considerata la più influente nelle analisi del ciclo di vita a causa della sua maggiore incidenza energetica nel ciclo di vita complessivo.

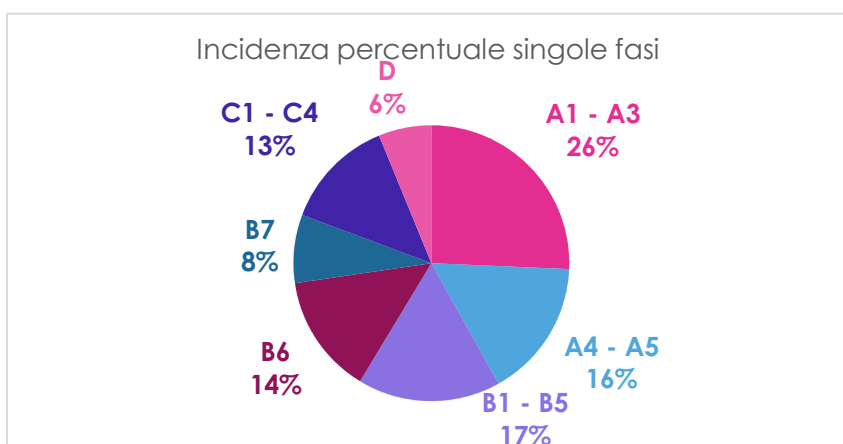


FIG. 12 DIAGRAMMA A TORTA CHE MOSTRA L'INCIDENZA PERCENTUALE DEI CONTRIBUTI AFFERENTI ALLE SINGOLE FASI LCA SUL TOTALE DEI CONTRIBUTI OGGETTO DI REVISIONE

Tuttavia, la crescita di attrezzature e sistemi ad alta efficienza energetica, in combinazione con materiali isolanti più avanzati ed efficaci, ha permesso di contenere una parte dell'energia operativa. Di contro, la riduzione dei costi operativi ha portato a un aumento dei costi associati alle altre fasi del ciclo di vita dei materiali da costruzione [210] [211]. Infatti, nei primi quindici anni circa del XXI secolo, l'analisi di impatto ambientale del ciclo di vita di un edificio ha tenuto fortemente in considerazione solo la quota dell'energia operativa, a causa della sua maggiore incidenza energetica (e consequenzialmente economica) nel

ciclo di vita complessivo. Ciò ha portato il dibattito scientifico a concentrarsi sul contenimento dell'energia operativa, attraverso il miglioramento dell'efficienza prestazionale dei componenti e dei sottosistemi edilizi, trascurando però il consumo di energia delle altre fasi del ciclo di vita. Con la crescita della popolazione urbana e il conseguente aumento della domanda di materiali da costruzione per nuovi edifici, ampliamenti o ristrutturazioni, il carbonio incorporato è destinato a diventare, entro il 2050, la fonte principale dell'impatto degli edifici sulle emissioni di gas serra, contribuendo alla metà dell'intera impronta di carbonio delle nuove costruzioni. Si stima infatti un andamento, nel tempo, del rapporto tra energia incorporata ed energia operativa inversamente proporzionale [212]. Quest'andamento è compatibile con lo scenario analizzato dal World Green Building Council [213], network globale che riunisce associazioni nazionali indipendenti che operano nel settore dell'edilizia sostenibile, per il quale, con l'aumento della popolazione mondiale, il patrimonio edilizio globale raddoppierà, contribuendo ad un raddoppio del consumo globale di materie prime entro la metà del secolo. Il consumo globale di cemento dovrebbe aumentare del 12 – 23% mentre la produzione mondiale di acciaio dovrebbe aumentare del 30%. Per questo motivo è necessario attuare strategie volte alla chiusura dei cicli produttivi in modo da evitare ulteriore consumo di materie prime e suolo, con conseguente risparmio anche in termini di emissioni. In questa prospettiva, il modulo D che copre i benefici netti derivanti dal riutilizzo, dal riciclaggio e dal recupero di energia da materiali/componenti che lasciano il confine del sistema, che sono stati generati come rifiuti e che hanno raggiunto la fine dello stato di rifiuto dalla fase di costruzione, utilizzo e fine vita, risulta essere un passaggio necessario per la chiusura del cerchio, concetto chiave dell'Economia Circolare. E', dunque, necessario che il sistema edificio sia oggetto di una decostruzione, ovvero di una demolizione selettiva, una pratica ad alta intensità di manodopera, costosa e che richiede del tempo maggiore rispetto ad una demolizione tradizionale [214]. Sebbene sono numerosi i benefici ambientali e socio-economici legati alla pratica di riutilizzo, riciclaggio e recupero, l'attuale mercato dei rifiuti e le condizioni aziendali presenti non sono ancora sufficientemente pronte a gestire tale nuovo approccio di tipo circolare, infatti, bisognerebbe rafforzare, ad esempio, le relazioni tra l'edilizia e altri settori produttivi, sensibilizzare maggiormente progettisti e committenti, delineare normative che promuovano tali interventi di decostruzione, incentivare lo sviluppo di piattaforme web dedicate per l'acquisto di prodotti o materiali di recupero per l'edilizia [15]. Questo potrebbe essere il motivo per il quale non sono stati meno numerosi i contributi fino ad oggi, dedicati al modulo D, proprio in relazione alle diverse difficoltà e carenze di informazioni e fattibilità.

ANDAMENTO NELL'INTERVALLO DI TEMPO

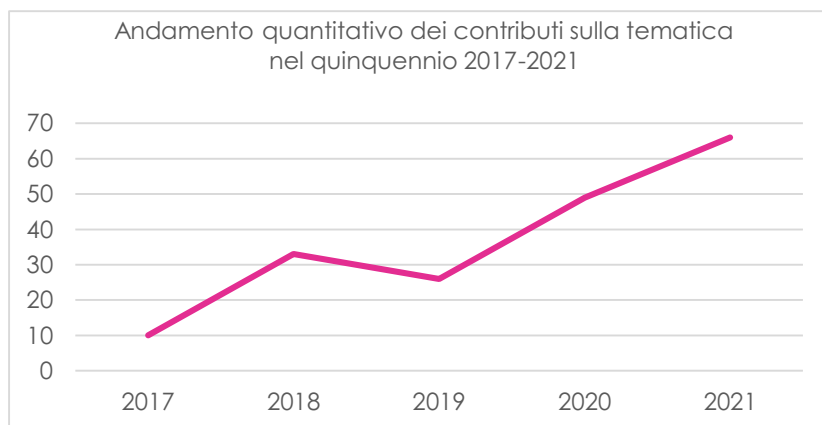


FIG. 13 ANDAMENTO DEL VOLUME DI CONTRIBUTI SULLA TEMATICA NELL'ARCO TEMPORALE 2017-2021

In figura 13 si evince che tra il 2017 e il 2018 l'interesse intorno alla tematica è triplicato; rilevante è anche il passaggio dal biennio 2018-2019 al 2020-2021, in quanto il numero di contributi è raddoppiato. In generale, il trend in relazione al numero di contributi risulta decisamente in crescita. Questo incremento così importante e repentino è legato al fatto che le diverse normative in materia ambientale, emanate e attuate a livello mondiale ed europeo, sono diventate anno

dopo anno, sempre più stringenti in termini di obiettivi da raggiungere e risultati da ottenere, spingendo studiosi, accademici ed enti di ricerca a dedicarsi a tale tematica con l'obiettivo di individuare strategie migliorative e linee guide utili al settore dell'edilizia.

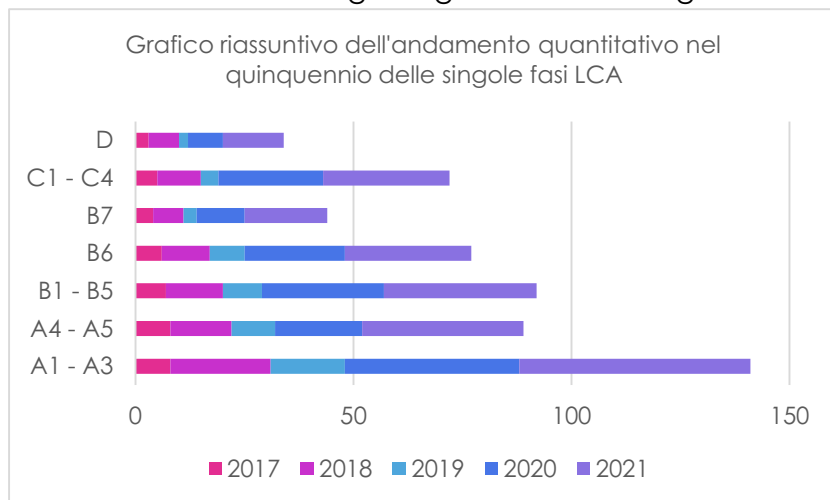


FIG.14 ISTOGRAMMA RIASSUNTIVO DELL'ANDAMENTO QUANTITATIVO DELLE SINGOLE FASI LCA PER OGNI ANNO ANALIZZATO

Come per ogni ricerca, questa analisi di letteratura presenta alcuni limiti, principalmente legati alla natura intrinseca dell'approccio bibliometrico. Prima di tutto, le parole chiave sono state scelte sulla base della letteratura precedente e diversi studi per garantire una coerenza scientifica. Tuttavia, potrebbero esserci lavori correlati che non sono coperti dalla ricerca proposta, ma la scelta di usare solo queste quattro parole chiave è da ricercare nel fatto che più grande è il numero di

parole chiave più possono aumentare il rumore nel campione e il rischio di includere articoli non correlati. In secondo luogo, questo studio ha utilizzato sia WoS che Scopus. La prospettiva globale può essere migliorata con l'inclusione di altri database. Inoltre, c'è da sottolineare che molti sforzi nel promuovere l'abbattimento delle emissioni di GHG sono stati fatti da organizzazioni senza scopo di lucro, organizzazioni e istituzioni nazionali ed internazionali. Abbiamo visto come l'efficienza energetica nella fase operativa (fase di occupazione) degli edifici ha ricevuto un'attenzione significativa da parte dei ricercatori. L'utilizzo di componenti aggiuntivi, performanti e costituiti da materiali perlopiù sintetici e di nuova generazione, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza energetica, può avere gravi conseguenze, causando effetti di rimbalzo [215] o spostando gli oneri ambientali dalla fase di occupazione ad altre fasi del ciclo di vita [216]. Il carbonio, come il denaro, ha un valore temporale, infatti, un chilogrammo di emissioni evitate oggi vale più di un chilogrammo di emissioni ipoteticamente risparmiate in futuro [217]. Ciò dovrebbe portare la comunità scientifica a sviluppare e promuovere ricerche e studi che si focalizzassero nelle fasi finali del ciclo di vita del sistema edificio, in quanto queste ultime, congiuntamente alla fase di progettazione e produzione dell'edificio stesso, sono le protagoniste della chiusura del cerchio produttivo e della conseguente riduzione/abbattimento di emissioni climalteranti, consumo di energia e consumo di materia prima.

DEFINIZIONE DELL'AMBITO DI INDAGINE

Partendo dalla necessità di "chiudere il cerchio" dei processi, precedentemente esposta nel capitolo introduttivo, l'obiettivo da perseguire nel settore delle costruzioni è sviluppare una strategia progettuale che sia rigenerativa e che elimini il concetto stesso di RIFIUTO prevedendo a monte il reinserimento dei materiali dopo l'uso in ulteriori cicli tecnici chiusi. In questo senso l'edificio è inteso come una ricca fonte di nutrienti tecnici piuttosto che come una incubatrice di materiali destinati poi a diventare rifiuti. Data la stratificazione che caratterizza il sistema edificio, è necessario che venga progettato in modo da essere scomponibile nei suoi sottosistemi, disassemblandone elementi tecnici, componenti e materiali per reintrodurli nei rispettivi cicli produttivi. Quindi per poter sviluppare un approccio *cradle to cradle*, dalla culla alla culla, devono integrarsi strategie progettuali di disassemblaggio e il recupero/riciclo dei componenti, chiamato DESIGN FOR DISASSEMBLY E DESIGN FOR

RECYCLING. Ciò comporterà minore spreco di materiali e consumo di materia prima, riduzione di consumi energetici, minore uso di acqua ed emissioni di CO₂ in atmosfera. Poiché il modulo D copre i benefici e i carichi netti derivanti dal riutilizzo, dal riciclaggio e dal recupero di energia da materiali/componenti che lasciano il confine del sistema, è necessario che il sistema edificio sia oggetto di una decostruzione, ovvero di una demolizione selettiva. In questo senso, i CAM italiani impongono tale standard tramite alcuni criteri di base, nelle SPECIFICHE TECNICHE PROGETTUALI PER GLI EDIFICI all'art. 2.4.14 *Disassemblaggio e Fine vita* e nelle SPECIFICHE TECNICHE PROGETTUALI RELATIVE AL CANTIERE all'art. 2.6.2 *Demolizione selettiva, recupero e riciclo* [205];

2.4.14 Disassemblaggio e fine vita

Criterio

Il progetto relativo a edifici di nuova costruzione, inclusi gli interventi di demolizione e ricostruzione e ristrutturazione edilizia, prevede che almeno il 70% peso/peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati utilizzati nel progetto, esclusi gli impianti, sia sottoponibile, a fine vita, a disassemblaggio o demolizione selettiva (decostruzione) per essere poi sottoposto a preparazione per il riutilizzo, riciclaggio o altre operazioni di recupero.

L'aggiudicatario redige il piano per il disassemblaggio e la demolizione selettiva, sulla base della norma ISO 20887 "*Sustainability in buildings and civil engineering works- Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance*", o della UNI/PdR 75 "*Decostruzione selettiva - Metodologia per la decostruzione selettiva e il recupero dei rifiuti in un'ottica di economia circolare*" o sulla base delle eventuali informazioni sul disassemblaggio di uno o più

componenti, fornite con le EPD conformi alla UNI EN 15804, allegando le schede tecniche o la documentazione tecnica del fabbricante dei componenti e degli elementi prefabbricati che sono recuperabili e riciclabili. La terminologia relativa alle parti dell'edificio è in accordo alle definizioni della norma UNI 8290-1.

Verifica

Il progettista redige il piano per il disassemblaggio e la demolizione selettiva come sopra indicato.

2.6.2 Demolizione selettiva, recupero e riciclo

Criterio

Fermo restando il rispetto di tutte le norme vigenti, la demolizione degli edifici viene eseguita in modo da massimizzare il recupero delle diverse frazioni di materiale. Nei casi di ristrutturazione, manutenzione e demolizione, il progetto prevede, a tal fine, che, almeno il 70% in peso dei rifiuti non pericolosi generati in cantiere, ed escludendo gli scavi, venga avviato a operazioni di preparazione per il riutilizzo, riciclaggio o altre operazioni di recupero, secondo la gerarchia di gestione dei rifiuti di cui all'art. 179 del decreto legislativo 3 aprile 2006 n. 152.

Il progetto stima la quota parte di rifiuti che potrà essere avviato a preparazione per il riutilizzo, riciclaggio o altre operazioni di recupero.

A tal fine può essere fatto riferimento ai seguenti documenti: "Orientamenti per le verifiche dei rifiuti prima dei lavori di demolizione e di ristrutturazione degli edifici" della Commissione Europea, 2018; raccomandazioni del Sistema nazionale della Protezione dell'Ambiente (SNPA) "Criteri ed indirizzi tecnici condivisi per il recupero dei rifiuti inerti" del 2016; UNI/PdR 75 "Decostruzione selettiva – Metodologia per la decostruzione selettiva e il recupero dei rifiuti in un'ottica di economia circolare".

Tale stima include le seguenti:

- a. valutazione delle caratteristiche dell'edificio;
- b. individuazione e valutazione dei rischi connessi a eventuali rifiuti pericolosi e alle emissioni che possono sorgere durante la demolizione;

- c. stima delle quantità di rifiuti che saranno prodotti con ripartizione tra le diverse frazioni di materiale;
- d. stima della percentuale di rifiuti da avviare a preparazione per il riutilizzo e a riciclo, rispetto al totale dei rifiuti prodotti, sulla base dei sistemi di selezione proposti per il processo di demolizione;

Alla luce di tale stima, il progetto comprende le valutazioni e le previsioni riguardo a:

- a. rimozione dei rifiuti, materiali o componenti pericolosi;
- b. rimozione dei rifiuti, materiali o componenti riutilizzabili, riciclabili e recuperabili.

In caso di edifici storici per fare la valutazione del materiale da demolire o recuperare è fondamentale effettuare preliminarmente una campagna di analisi conoscitiva dell'edificio e dei materiali costitutivi per determinarne, tipologia, epoca e stato di conservazione.

Il progetto individua le seguenti categorie di rifiuti:

- rifiuti suddivisi per frazioni monomateriali (codici EER 170101, 170102, 170103, 170201, 170202, 170203, 170401, 170402, 170403, 170404, 170405, 170406, 170504, 170604, 170802) da avviare a operazioni di preparazione per il riutilizzo, impiegati nello stesso cantiere oppure, ove non fosse possibile, impiegati in altri cantieri;
- rifiuti suddivisi per frazioni monomateriali (codici EER 170101, 170102, 170103, 170201, 170202, 170203, 170401, 170402, 170403, 170404, 170405, 170406, 170504, 170604, 170802) da avviare a operazioni di riciclo o ad altre forme di recupero;
- le frazioni miste di inerti e rifiuti (codice EER 170107 e 170904) derivanti dalle demolizioni di opere per le quali non è possibile lo smontaggio e la demolizione selettiva, che sono avviati ad impianti per la produzione di aggregati riciclati.

In considerazione del fatto che, in fase di demolizione selettiva, potrebbero rinvenirsi categorie di rifiuti differenti da quelle indicate (dovute ai diversi sistemi costruttivi e materiali ovvero componenti impiegati nell'edificio), è sempre suggerita l'adozione di tutte le precauzioni e gli accorgimenti atti ad avviare il maggior quantitativo di materiali non pericolosi a riciclo e ad altre operazioni di recupero

Verifica

La Relazione CAM, di cui criterio "2.2.1-Relazione CAM", illustra in che modo il progetto ha tenuto conto di questo criterio progettuale.

FIG.15 STRALCIO DEGLI ARTICOLI 2.4.14 E 2.6.2 DEI CAM

Quindi le fasi C e D risultano essere strettamente connesse tra loro e consequenziali, oltre ad essere le fasi più determinanti per la chiusura del cerchio, insieme alla fase di progettazione.

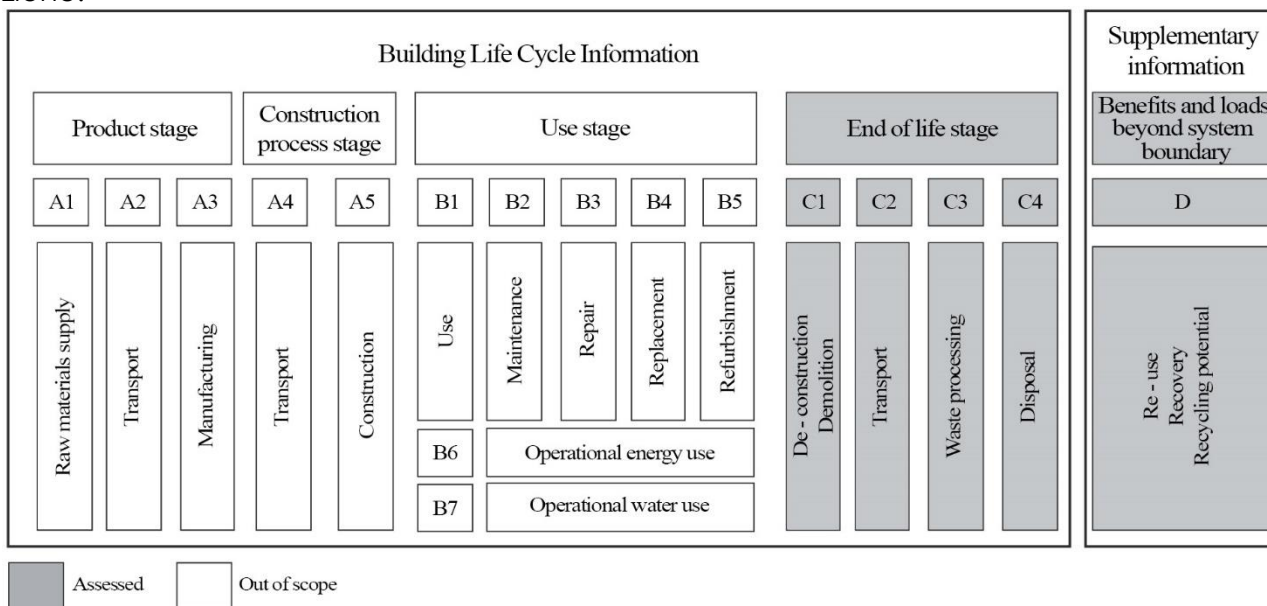


FIG.16 LIFE CYCLE STAGES FROM BS EN 15978:2011 SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION WORKS CON INDICAZIONE DEI MODULI LCA OGGETTO DI STUDIO NEL PRESENTE LAVORO

Inoltre, la fase iniziale (produzione e costruzione) è stata ampiamente indagata in questi ultimi anni, come testimoniano diverse pubblicazioni nel settore come si evince dall'analisi dello stato dell'arte. Precedenti studi dell'autrice, in cui si è analizzato le fasi iniziali del ciclo di vita degli edifici, hanno evidenziato una maggiore predisposizione alla decostruzione e al disassemblaggio, nonché minori impatti ambientali in termini di Embodied Carbon ed Embodied Energy, dei sistemi costruttivi denominati "a secco", caratterizzati spesso da un alto livello di prefabbricazione. Questi ultimi possono essere individuati in sistemi costruttivi in acciaio e sistemi costruttivi in legno ed anche misti.

Uno studio precedente condotto dall'autrice, pubblicato sulla rivista internazionale Sustainability, ha dimostrato che un sistema costruttivo in legno, modello 3, è il sistema costruttivo con il valore più basso di energia e carbonio primario incorporato, e quindi migliore dal punto di vista dell'impatto ambientale, rispetto ad un edificio tradizionale in c.a. e uno in acciaio. Inoltre, una prima strategia di mitigazione attuata, che consiste nell'uso di indici di materiali secondari, ha ridotto Embodied Carbon ed Embodied Energy, e nello specifico i materiali strutturali del modello 2, con struttura portante in acciaio hanno ottenuto la maggiore riduzione di tali valori. Ciò è dovuto alla composizione dei materiali e dei componenti più adatti al riciclo o alla reintroduzione nel ciclo di produzione: acciaio per la struttura portante; acciaio per le connessioni; profili in alluminio; cartongesso; acciaio inox per i supporti e legno, vetro. [218]

Una seconda strategia di mitigazione consisteva nel sostituire i materiali isolanti con coefficienti di EE e EC inferiori a quelli utilizzati nella progettazione dei materiali strutturali.

In particolare, sono stati sostituiti i materiali dell'involucro, del tetto e delle solette. I materiali isolanti utilizzati nel modello 1, l'intonaco in lana di roccia e l'isolante in EPS, sono stati sostituiti con pannelli di sughero. Nel modello 2, il pannello di sughero ha sostituito il materiale isolante in lana di vetro sul tetto. Nel modello 3, il pannello di sughero ha sostituito il materiale isolante utilizzato per l'involucro, gli orizzonti del tetto, la pietra e l'intonaco di lana.

Questa strategia ha portato a maggiori riduzioni dell'energia e del carbonio incarnato, come si evince nella figura 17. L'analisi critica dei risultati ottenuti ha permesso di individuare

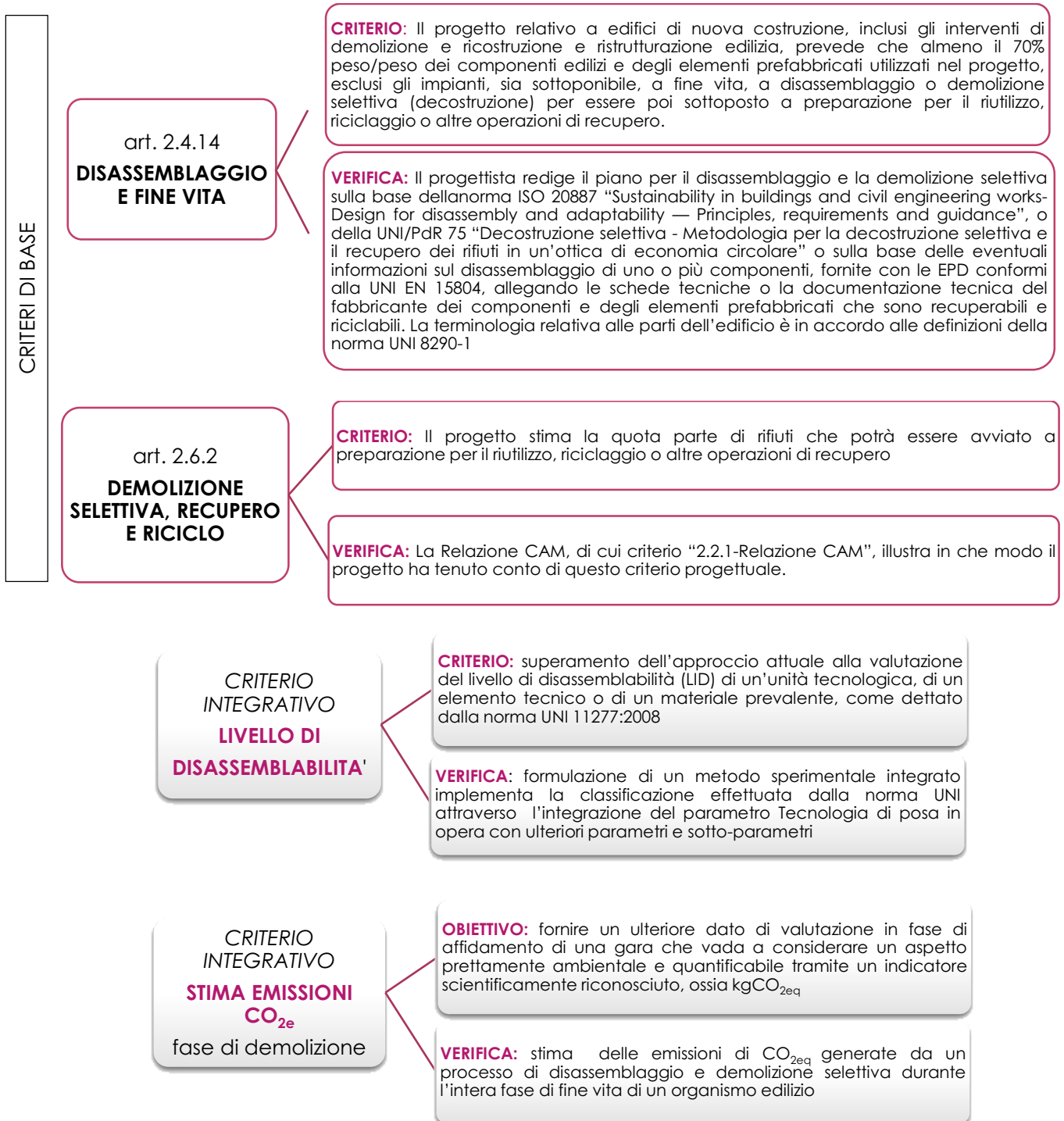
nel sistema costruttivo a secco (con riferimento ai modelli 2 e 3, con struttura portante in metallo e in legno), le caratteristiche più rispondenti agli obiettivi di riduzione degli impatti ambientali in termini di EE e EC. Per questo motivo, il campo d'indagine del presente studio è caratterizzato da tecnologie costruttive prettamente 'a secco' (o al più miste).

| | EE Primary Secondary <i>Improvement</i> | EC Primary Secondary <i>Improvement</i> | Mitigation EE | Mitigation EC |
|-----|--|--|------------------|------------------|
| M-1 | 5576 | 413 | 23.08% | 24.21% |
| | 4289 | 313 | 5.69% | 2.87% |
| | 4045 | 304 | | |
| M-2 | 5329 | 419 | 53.08% | 51.55% |
| | 2500 | 203 | 0.12% | 0.49% |
| | 2497 | 202 | | |
| M-3 | 5228 | 322 | 33.72% | 37.27% |
| | 3465 | 202 | 10.97% | 12.87% |
| | 3085 | 176 | | |

FIG.17 PERCENTUALI DI RIDUZIONE DI EE E EC, TRA MATERIALI PRIMARI, SECONDARI E DI MIGLIORAMENTO FONTE: "MITIGATION STRATEGIES FOR REDUCTION OF EMBODIED ENERGY AND CARBON, IN THE CONSTRUCTION SYSTEMS OF CONTEMPORARY QUALITY ARCHITECTURE" SICIGNANO, DI RUOCCO, MELELLA, SUSTAINABILITY 2019

OBIETTIVI

Attraverso questo studio si intende focalizzare l'attenzione sulla fase di fine vita di edifici assemblati a secco, proponendo il soddisfacimento di criteri aggiuntivi a quelli già previsti dalla normativa CAM, che viaggiando paralleli a quest'ultimi risultano ad essi complementari ed integrativi. Infatti, andando ad implementare con il Livello di Disassemblabilità dei sistemi costruttivi e la quantità di emissioni di CO_{2eq} prodotte a seguito delle attività di demolizione, si forniscono informazioni utili sia per i progettisti, durante la fase di progettazione per la scelta delle più opportune tecnologie costruttive, e sia per le pubbliche amministrazioni in fase di aggiudicazione della gara.



art. 2.7.2
METODOLOGIE DI OTTIMIZZAZIONE DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI PER LA SOSTENIBILITÀ (LCA E LCC)

CRITERIO: È attribuito un punteggio premiante all'operatore economico che si impegna a realizzare uno studio LCA (valutazione ambientale del ciclo di vita) secondo le norme UNI EN 15643 e UNI EN 15978 e uno studio LCC (valutazione dei costi del ciclo di vita), secondo la UNI EN 15643 e la UNI EN 16627, per dimostrare il miglioramento della sostenibilità ambientale ed economica del progetto di fattibilità tecnico-economica approvato.

VERIFICA: L'operatore economico dimostra la sua capacità di approntare uno studio LCA e LCC del progetto di fattibilità tecnico economica descrivendo, nell'offerta tecnica di gara, la metodologia di LCA e LCC che intende adottare, gli strumenti tecnici di cui dispone (software, banche dati, BIM), gli eventuali esperti di cui si avvarrà, l'organizzazione e il cronoprogramma della valutazione del ciclo di vita rispetto alle modalità e tempi di definizione del progetto

art. 2.7.3
PROGETTAZIONE IN BIM

CRITERIO: Nei casi di bandi di progettazione in cui si richiede il BIM, è attribuito un punteggio premiante all'operatore economico che si impegna a implementare la base dati del BIM con le informazioni ambientali relative alle specifiche tecniche di cui ai capitoli "2.4-Specifiche tecniche progettuali per gli edifici", "2.5-Specifiche tecniche per i prodotti da costruzione" e "2.6-Specifiche tecniche progettuali relative al cantiere".

VERIFICA: L'operatore economico presenta dichiarazione di impegno ad eseguire le prestazioni migliorative di cui al criterio e offerta tecnico-metodologica con la quale illustri la prestazione offerta

SOFTWARE END-OF-LIFE MODEL CALCULATOR
fasi C e D LCA

OBIETTIVO: creazione di un software di calcolo online facilmente fruibile per la fase di demolizione di un edificio e per la individuazione di destinazioni future degli elementi/componenti/materiali disassemblati

RISULTATO: documento da allegare alla Relazione CAM che il progettista deve redigere, come previsto dall'art. 1.3.3

FIG.18 SCHEMA RIASSUNTIVO DEI CRITERI CAM VERIFICATI DA TALE STUDIO, DEI CRITERI INTEGRATIVI PROPOSTI E DELLE IMPLEMENTAZIONI FUTURE SULLA BASE DEI CRITERI PREMIANTI PER L'AFFIDAMENTO DEL SERVIZIO DI PROGETTAZIONE

METODOLOGIA

La metodologia proposta si articola nelle seguenti fasi:

1° Fase) **Caratterizzazione tecnologica dell'opera per elaborazione del piano di decostruzione selettiva**

- Unità tecnologiche ed elementi tecnici; tipologia di sistema costruttivo e sequenza di materiali prevalenti; tipologie di connessioni e materiali delle connessioni
- Verifica soddisfacimento criteri base CAM art. 2.4.14 e 2.6.2
- Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita

2° Fase) **Valutazione del Livello di Disassemblabilità CRITERIO INTEGRATIVO**

Metodo UNI (11277:2008)

Metodo sperimentale integrato:

- Integrazione di parametri in grado di coprire le fasi successive alla fase di smontaggio
- Determinazione sotto – parametri e potenzialità di recupero
- Assegnazione pesi

- Integrazione di informazioni sulla quantità di CO₂-eq generata dalla fase di smontaggio

3° Fase) **Stima delle emissioni di CO₂eq CRITERIO INTEGRATIVO**

Aliquota di emissioni di CO₂eq,1 prodotte dall'attività di demolizione:

- Determinazione del tipo di lavorazione necessaria per il disassemblaggio e la demolizione selettiva
- Determinazione dei tempi di funzionamento di strumenti, macchinari e apparecchi di sollevamento
- Stima delle emissioni prodotte da strumenti, macchinari e apparecchi di sollevamento

Aliquota di emissioni di CO₂eq,2 prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione:

- Determinazione della percentuale di materiale danneggiato (sfrido)
- Modellazione di un indice di riutilizzabilità
- Stima delle emissioni prodotte dallo sfrido

Aliquota di emissioni di CO₂eq,3 prodotte dal trasporto fuori dal sito:

- Classificazione dei rifiuti da demolizione in 3 macrocategorie
- Assegnazione di possibili destinazioni future e possibili tappe percorse dai mezzi di trasporto
- Definizione della tipologia di mezzo di trasporto utilizzato, delle modalità di trasporto e del numero di viaggi
- Stima delle emissioni prodotte dal trasporto fuori dal sito

Aliquota di emissioni di CO₂eq,4 prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo:

- Classificazione delle attività di trasformazione in 2macro – categorie
- Determinazione delle attività di trasformazione eseguite e attrezzature utilizzate
- Definizione della tipologia di elementi da sottoporre alle diverse attività di trasformazione e del numero di operazioni da eseguire
- Stima delle emissioni prodotte dalle attività di trasformazione

Aliquota di emissioni di CO₂eq,5 quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale (per gli edifici in legno)

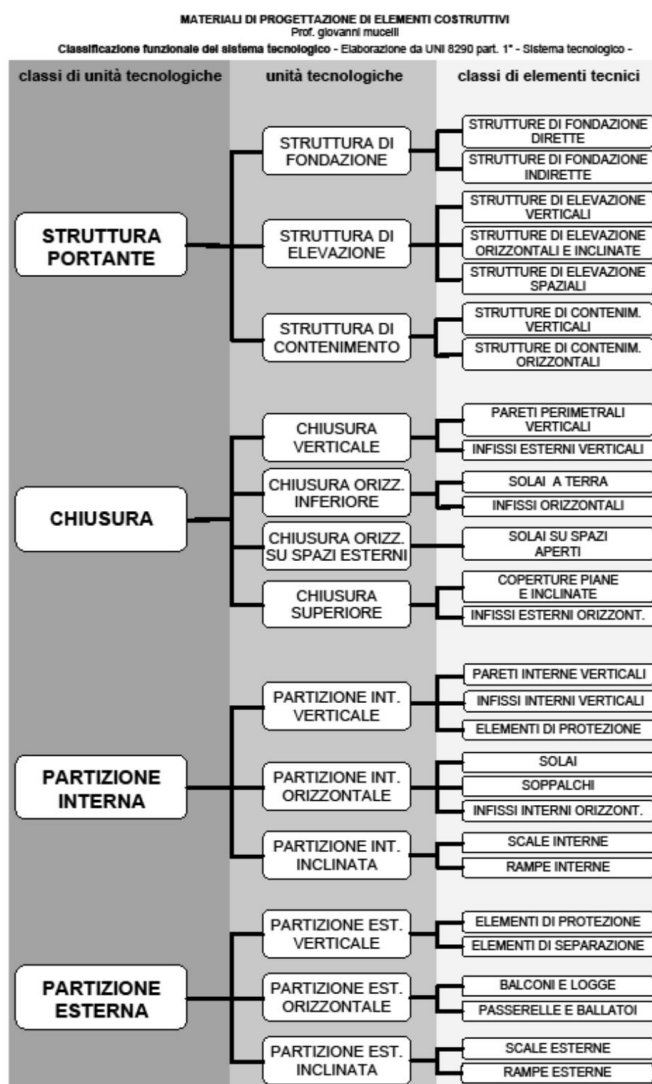


FIG. 19 UNITÀ TECNOLOGICHE, DEFINIZIONI E RELATIVI ELEMENTI TECNICI PREVISTI DA UNI 8290-1:2011 (FONTE: ELEMENTI DI CULTURA TECNICA, C. MOLINARI, MAGGIOLIEDITORE)

indagine, tutti gli impianti di fornitura servizi (impianti di climatizzazione, idrosanitari, di smaltimento, elettrici.), tutti gli impianti di sicurezza (antincendio, messa a terra, parafulmine, antifurto), gli arredi e gli allestimenti esterni, considerati elementi invariati.

Verifica soddisfacimento criteri base art. 2.4.14 e 2.6.2 e Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita

Come previsto dall'art. 2.6.2, il progettista deve redigere un elenco dei materiali e delle componenti che giunti a fine vita utile per l'edificio, possono essere reimpiegati con diverse finalità; queste ultime seguono un livello di importanza gerarchica (come indicato dalla piramide della gerarchia dei rifiuti) dalla più efficiente, il riutilizzo, allo scenario peggiore, lo smaltimento in discarica.

La stima dei generi di rifiuti avviene attraverso l'assegnazione, a ciascun materiale prevalente, di un codice dell'elenco europeo dei rifiuti [220], attraverso il quale è possibile determinare la natura del materiale prevalente. Per l'identificazione dei rifiuti generati dal processo di disassemblaggio e demolizione selettiva è stato consultato il capitolo 17

1° Fase - Caratterizzazione tecnologica dell'opera

Attraverso la norma UNI 8290-1:1981 [219], è stata effettuata una classificazione e articolazione delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici nei quali è scomposto un sistema tecnologico. Quest'ultimo è infatti definito, dalla norma UNI 7867, come un insieme strutturato di unità tecnologiche ed elementi tecnici secondo la fase operativa meta-progettuale o progettuale del processo edilizio.

La scomposizione presenta due livelli e dà luogo a due insiemi denominati: unità tecnologiche ed elementi tecnici.

Le voci dei due insiemi sono selezionate secondo criteri di omogeneità: peculiarità (del materiale o delle modalità di esecuzione), caratteristiche dimensionali o prestazionali.

Le voci delle unità tecnologiche sono tali da essere le più opportune a rappresentare funzioni finalizzate a soddisfare le esigenze dell'utenza. Le voci degli elementi tecnici corrispondono, invece, a classi di prodotti che configurano modalità di risposta complessiva o parziale delle unità tecnologiche.

Lo schema di classificazione del sistema tecnologico, in unità tecnologiche ed elementi tecnici, è riportato in figura 19. Sono stati esclusi, dalle unità tecnologiche di in-

dell'elenco, il quale riporta un codice a sei cifre per qualsiasi rifiuto delle attività di costruzione e demolizione, compreso il terreno provenienti da siti contaminati (cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche – legno, vetro e plastica – metalli – miscele bituminose e prodotti contenenti catrame – terra, rocce e materiali di dragaggio – materiali isolanti – materiali da costruzione a base di gesso). L'elenco consente inoltre l'individuazione di eventuali rifiuti pericolosi da destinare a discarica. All'interno dell'elenco, infatti, i rifiuti considerati pericolosi, ai sensi della Direttiva 2008/98/CE [221], sono contrassegnati da un asterisco (*).

La stima delle quantità di rifiuti avviene attraverso l'assegnazione, a ciascun materiale prevalente, di una destinazione futura, in funzione della natura del materiale prevalente, determinata attraverso l'assegnazione del codice dell'elenco europeo dei rifiuti e della sua predisposizione ad attività di riutilizzo o riciclaggio. Le destinazioni future, come visto, prevedono attività di recupero/riutilizzo, presso centri di trasformazione o rivenditori professionisti, operazioni di riciclo, presso centri di riciclaggio, o attività di valorizzazione dei rifiuti in discarica.

La quantità di materiale da destinare ad attività di recupero/riutilizzo è ottenuta dalla percentuale di materiale riutilizzabile, quest'ultima desunta dall'applicazione dell'indice di riutilizzabilità, avente come destinazione futura centri di trasformazione o rivenditori professionisti. A questo scopo, è stato consultato il progetto PROGRESS [222], finanziato dall'UE, che ha sviluppato un Indice di riutilizzabilità, in grado di determinare la percentuale di componenti riutilizzabili di edifici con struttura in acciaio ad un piano attraverso la valutazione di una serie di parametri corrispondenti ad una serie di operazioni svolte durante l'attività di demolizione. L'Indice di riutilizzabilità sviluppato dal progetto PROGRESS è stato modellato nel rispetto dell'ambito di indagine della metodologia proposta. L'indice di riutilizzabilità è caratterizzato da:

- indicatori (i); attività di demolizione che potenzialmente potrebbero danneggiare il materiale;
- pesi (P); sono assegnati a ciascun parametro in funzione dell'influenza e dell'importanza rivestita dal parametro all'interno dell'attività di recupero;
- sotto - indicatori (s); corrispondono a caratteristiche del materiale, rappresentative del grado di predisposizione al danneggiamento, o ad una diversificazione delle attività di demolizione;
- potenzialità di recupero (%); corrispondono a percentuali assegnate a ciascun sotto
- indicatore in funzione del grado di danneggiamento arrecato al materiale.

| Indicatori | | 0 - 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
|------------|--------------------------------------|---|--|--|---|---|
| i_1 | Danno da smontaggio | Sistema "a umido" Leganti | Sistema "saldato" Saldature autogene ed eterogene | Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" Chiodature, rivettature | Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" Bullonature difficilmente accessibili, avvitate | Sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" Bullonature, sovrapposizione, ad incastro |
| | Pesi $P_1 = 0,50$ | Sistema "adesivo" Adesivi | | | | |
| | s_1 | | | | | |
| i_2 | Movimentazione $P_2 = 0,25$ | Elementi fragili | Autogrù telescopica Lunghezza degli elementi superiore a 12,00 m | Autogrù telescopica Lunghezza degli elementi inferiore a 12,00 m | Dispositivi di sollevamento (sollevatore telescopico e ceste in metallo) | Manuale |
| i_3 | Modifica in officina $P_3 = 0,25$ | Rigenerazione completa o non riutilizzabilità | Rimozione di parti saldate (piastre, connettori a taglio) e/o rimozione delle imperfezioni generate dal procedimento di taglio al plasma | Rimozione di parti forate provocate da unioni bullonate, avvitate, ed eventuale aggiunta di nuovi fori | Rimozione di imperfezioni superficiali, di parti danneggiate durante lo smontaggio e/o il trasporto | Pulitura e rifacimento del sistema di protezione alla corrosione |
| | | | | | | s_3 |

TAB.2 SCHEMA RIASSUNTIVO DEGLI INDICATORI E SOTTO-INDICATORI E DEI RELATIVI PESI PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI RIUTILIZZABILITA'

La quantità di materiale da destinare ad operazioni di riciclo è ottenuta dalla quantità di materiale avente come destinazione futura centri di riciclaggio e dalla percentuale di materiale non riutilizzabile, perché danneggiato (sfrido).

La quantità di materiale da destinare a discarica/valorizzazione è ottenuta dalla quantità di materiale pericoloso o contaminato, avente come destinazione futura una discarica.

Note le quantità di materiale per ciascuna destinazione futura è possibile determinare:

- l'incidenza della quantità di materiale da destinare al recupero/riutilizzo;
- l'incidenza della quantità di materiale da destinare ad operazioni di riciclo;
- l'incidenza della quantità di materiale da destinare a discarica/valorizzazione

L'indice di riutilizzabilità è ottenuto dalla sommatoria dei prodotti tra le potenzialità di recupero (%), scelte per ciascun indicatore (i) in funzione dei sotto – indicatori (s), e i relativi pesi (p). Grazie a tale indice riusciamo a calcolare il peso in kg dei materiali e delle componenti che è possibile riutilizzare/riciclare/smaltire a fine vita utile dell'edificio e, di conseguenza, verificare se vengono soddisfatte le soglie in percentuale imposte dai CAM, ossia almeno il 50% peso/peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati, escludendo gli impianti, deve essere sottoponibile a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile. Di tale percentuale, almeno il 15% deve essere costituito da materiali non strutturali.

2° Fase - Valutazione del livello di disassemblabilità

Il potenziale di riutilizzo di organismi edilizi, componenti edilizi e materiali da costruzione è strettamente connesso al loro livello di disassemblabilità, il quale rappresenta la capacità di un organismo edilizio, di componenti edilizi o di materiali da costruzione di essere smontati e reimmessi nel ciclo produttivo, stabilendo così una continuità sostenibile tra la fase di fine vita (dismissione del manufatto edilizio) e la fase produttiva dei singoli componenti edilizi. L'approccio attuale alla valutazione del livello di disassemblabilità (LID) di un'unità tecnologica, di un elemento tecnico o di un materiale prevalente è dettato dalla norma UNI 11277:2008 [223].

Metodo UNI

Il metodo proposto dalla norma UNI assegna un punteggio, da 0 a 5, esclusivamente in funzione della tecnologia di posa in opera e del sistema costruttivo del materiale prevalente. Noto il punteggio di ciascun materiale prevalente, il livello di disassemblabilità dell'unità tecnologica è considerata pari alla media dei punteggi dei materiali prevalenti che la compongono (tab.3).

| Building system | Laying technology | LID |
|---|---|------------|
| Wet system | Hydraulic and air binders | 0 |
| Adhesive system | Fusion adhesives, evaporation adhesives | 0 |
| Dry system with clamping technique | Nailing, bolting, screwing | 3 |
| Dry system with interlock technique | Snap-in | 3 |
| Dry system with juxtaposition technique | Simple overlapping | 5 |

TAB.3 CLASSIFICAZIONE DEL LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ (LID) (FONTE: UNI 11277:2008)

Tale metodo, essendo privo di indicatori o informazioni sulle fasi successive alla fase di smontaggio e che precedono la reintroduzione dei singoli materiali prevalenti all'interno del ciclo produttivo, consente una valutazione parziale del livello di disassemblabilità (LID) di un organismo edilizio o di una singola unità tecnologica.

Al fine di definire un metodo integrato per la valutazione del livello di disassemblabilità la ricerca propone un'implementazione della classificazione effettuata dalla norma UNI 11277:2008.

Metodo sperimentale integrato

Il metodo sperimentale integrato implementa la classificazione effettuata dalla norma UNI 11277:2008.

Il primo step vede l'integrazione del parametro Tecnologia di posa in opera, riportato dal metodo UNI, con altri due parametri riguardanti le fasi successive alla fase di smontaggio e che precedono la reintroduzione dei singoli materiali prevalenti nel ciclo produttivo:

- Movimentazione e trasporto, tiene conto della probabilità di danneggiamento del materiale durante il trasporto al suolo e il caricamento su autoarticolato;
- Modifica in officina, tiene conto della perdita di materiale durante le attività di trasformazione per successivo riutilizzo, le quali precedono la reintroduzione dei materiali nel ciclo produttivo.

Successivamente, per ciascun parametro precedentemente elencato, è stata definita una serie di sotto-parametri e una potenzialità di recupero, espressa in percentuale, in funzione del grado di danneggiamento arrecato al materiale.

I sotto-parametri del parametro Tecnologia di posa in opera corrispondono a diversi sistemi costruttivi, caratterizzati da una diversa predisposizione al danneggiamento durante la rimozione delle connessioni.

I sotto-parametri dei parametri Danni da movimentazione e trasporto corrispondono alle diverse modalità di trasporto al suolo e caricamento su autocarro o autoarticolato, caratterizzate da una diversa predisposizione al danneggiamento.

I sotto-parametri del parametro Attività di trasformazione corrispondono a diverse attività di trasformazione caratterizzate da differenti percentuali di materiale asportato.

Inoltre, a ciascun parametro sono stati assegnati dei pesi, in funzione dell'importanza rivestita dal parametro.

Il punteggio (LID) da assegnare a ciascun materiale prevalente, appartenente ad una determinata unità tecnologica, è ottenuto dalla sommatoria dei prodotti tra le potenzialità di recupero, scelte per ciascun parametro in funzione dei sotto-parametri, e i pesi assegnati a ciascun parametro.

$$LID = \sum \text{potenzialità di recupero (indicatore } i\text{-esimo)} \times \text{peso (indicatore } i\text{-esimo)}$$

Il punteggio da assegnare all'elemento tecnico è ottenuto come la media dei punteggi degli elementi prevalenti che lo compongono.

Si riporta, di seguito, una tabella che mostra la schematizzazione del metodo sperimentale integrato elaborato (tab.4).

| Sistema costruttivo e tecnologia di posa in opera - p = 0,60 | Danni movimentazione e trasporto p = 0,20 | Attività di trasformazione p = 0,20 |
|--|--|--|
| Sistema 'a umido' – leganti idraulici e aerei 0% | Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento 20% | Non riutilizzabilità 0% |
| Sistema adesivo- adesivi a fusione, a reazione chimica e a evaporazione 25% | Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con autogrù, L > 14m 40% | Taglio di parti forate provocate da unioni avvitare, chiodate 25% |
| Sistema assemblato 'a secco' con tecnica 'a serraggio' - chiodature 50% | Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con autogrù, L < 14m 60% | Piallatura 50% |
| Sistema assemblato 'a secco' con tecnica 'a serraggio' – bullonatore e avvitature 75% | Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% | Trattamento impregnante a spruzzo 75% |
| Sistema assemblato 'a secco' con tecnica 'a incastro' e 'ad accostamento' – incastro a scatto e semplice 100% | Trasporto manuale 100% | Pulitura generale 100% |

TAB. 4 METODO SPERIMENTALE INTEGRATO

3° Fase - Stima delle emissioni di CO_{2-eq}

In una quarta fase sono state stimate le emissioni di CO_{2-eq} generate da un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva durante l'intera fase di fine vita di un organismo edilizio caratterizzato da un sistema costruttivo in acciaio. Le emissioni di CO_{2-eq} sono ottenute dalla somma di quattro aliquote:

- aliquota di emissioni di CO_{2eq}, prodotte dall'attività di demolizione;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq2} prodotte dallo sfido conseguente alle operazioni di demolizione;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq3} prodotte dal trasporto fuori dal sito;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo.

$$\sum CO_{2eq} = CO_{2eq1} + CO_{2eq2} + CO_{2eq3} + CO_{2eq4}$$

CO_{2-eq, 1}, aliquota di emissioni prodotte dall'attività di demolizione

L'attività di demolizione è stata suddivisa in due operazioni di demolizione, rimozione delle connessioni e trasporto al suolo e caricamento su un autocarro o su un autoarticolato, al fine di associare a ciascun materiale prevalente uno strumento e/o un macchinario utilizzato per la rimozione delle connessioni, in funzione della tipologia di connessione, ed una modalità di trasporto al suolo e di caricamento su autocarro, in funzione delle caratteristiche dimensionali del materiale (peso, lunghezza).

L'assegnazione di strumenti e macchinari a ciascuna tipologia di connessione è avvenuta attraverso il protocollo PROGRESS, mentre la consultazione di schede tecniche di case produttrici di tecnologie all'avanguardia a supporto dei professionisti del mondo dell'edilizia ha consentito l'individuazione, per ciascun strumento e macchinario, del modello che più si adatta alla tipologia di connessione, come di seguito riportato:

| tipologia di connessione | Strumento/macchinario | Modello |
|--|--|--|
| Incastri a scatto, sovrapposizione | Smontaggio manuale | / |
| Bullonature (Bulloni M5-M12) | Avvitatori ad impulsi | HILTI SIW 22-A |
| Bullonature (Bulloni M8-M16 ad alta resistenza; M12-M27) | Avvitatori ad impulsi | HILTI SIW 22T-A 3/4 |
| Avvitature (viti per fissaggio, autoperforanti, autofilettanti) Rivettature | Trapani avvitatori | HILTI ST1800-A22 |
| Chiodature | Estrattori di chiodi, tenaglie | INNOVA |
| Adesivi a fusione, a reazione chimica, ad evaporazione | Smontaggio manuale, tirachiodi | / |
| Saldature autogene ed eterogene | Taglio al plasma manuale | CUTMASTER 120 |
| Leganti idraulici e aerei (solai di grandi dimensioni) | Escavatori muniti di martelli demolitori | TAKEUCHI [il modello dipende dall'entità dell'intervento] - martelli demolitori BOBCAT |
| Leganti idraulici e aerei (solai di piccole dimensioni) | Martelli demolitori | HILTI TE 3000-AVR |
| Leganti idraulici e aerei (pareti in CIs o in laterizi) | Martelli demolitori | HILTI TE 700-AVR SDS MAX |

Per la rimozione di connessioni situate in quota rispetto al piano di lavoro, a supporto di strumenti e macchinari è previsto l'utilizzo di apparecchi di sollevamento:

| Tipologia di lavoro/ Quota max | Piattaforma aerea | Modello |
|--|--|------------------------|
| Lavoro in interni Quota max = 5,90 m | Piattaforma verticale | GENIE GS 1330M E-Drive |
| Lavoro all'esterno Quota max, verticale = 20 m Quota max, orizzontale = 11,15 m | Piattaforma semovente a braccio articolato | GENIE Z-60/37 DC |
| Lavoro all'esterno Quota max, verticale = 43,15 m Quota max, orizzontale = 21,26 m | Piattaforma semovente a braccio articolato | GENIE ZX-135/70 DC |

Per la definizione delle modalità di trasporto al suolo e di caricamento su un autocarro, di un materiale o un gruppo di materiali, sono stati definiti degli intervalli di peso e di lunghezza. Inoltre, attraverso la consultazione di schede tecniche di case produttrici di apparecchiature di sollevamento, per ciascun intervallo di peso è stato definito il modello dell'apparecchiatura utilizzata:

| | Modalità di trasporto al suolo e di caricamento su autocarro | Modello |
|--|---|--|
| <25 kg, piano terra | Trasporto al suolo manuale | / |
| | P < 25 kg L < 1,50 m Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un gruppo di elementi con peso <2000kg, adagiati in una cesta in metallo agganciata ad un sollevatore telescopico | JCB 535-95 |
| <25 kg, piano terra | Trasporto al suolo manuale | / |
| | P < 25 kg L > 1,50 m Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un gruppo di elementi con peso <3500 kg, agganciati ad un sollevatore telescopico | JCB 535-95 |
| <25 kg, piani superiori al piano terra | P < 25 kg L < 1,50 m Trasporto al suolo, di un gruppo di elementi con peso <2000 kg, adagiati in una cesta in metallo agganciata ad un'autogrù telescopica o ad una gru a torre | TEREX [il modello dipende dall'entità dell'intervento] |
| | P < 25 kg L < 1,50 m Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un gruppo di elementi con peso <2000 kg, adagiati in una cesta in metallo agganciata ad un sollevatore telescopico | JCB 535-95 |
| <25 kg, piani superiori al piano terra | > 25 kg P < 3500 kg Trasporto al suolo, di un singolo elemento o di un gruppo di elementi, agganciati ad autogrù telescopica o una gru a torre | TEREX [il modello dipende dall'entità dell'intervento] |
| | > 25 kg P < 3500 kg Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un singolo elemento o di un gruppo di elementi, agganciati ad un sollevatore telescopico | JCB 535-95 |
| >25 kg | P < 25 kg L > 1,50 m Trasporto al suolo, di un gruppo di elementi, agganciati ad un'autogrù telescopica o una gru a torre | TEREX [il modello dipende dall'entità dell'intervento] |
| | P < 25 kg L > 1,50 m Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un gruppo di elementi con peso <3500 kg, agganciati ad un sollevatore telescopico | JCB 535-95 |
| >25 kg | P > 3500 kg Trasporto al suolo, di un singolo elemento, agganciato ad un'autogrù telescopica o una gru a torre | TEREX [il modello dipende dall'entità dell'intervento] |
| | P > 3500 kg Caricamento su autocarro o autoarticolato, di un singolo elemento o di un gruppo di elementi, agganciato ad un'autogrù telescopica o una gru a torre | JCB 535-95 |

I secondi necessari per la rimozione di una singola connessione, per ciascuno strumento e macchinario utilizzato, sono stati determinati attraverso i dati raccolti in letteratura, la visione di filmati corrispondenti a casi reali, schede tecniche di strumenti e macchinari utilizzati.

I materiali sono stati classificati in sette categorie, di seguito elencate:

1. elementi delle chiusure (superiori, orizzontali, inferiori) e delle partizioni (orizzontali, verticali, interne ed esterne), con peso < 25 kg e dimensioni < 1,50 m, adagiati in ceste in metallo;
2. elementi delle chiusure (superiori, orizzontali, inferiori) e delle partizioni (orizzontali, verticali, interne ed esterne), con dimensioni > 1,50 m;
3. elementi delle chiusure verticali e infissi esterni verticali, con peso < 25 kg;
4. elementi delle chiusure verticali e infissi esterni verticali, con peso > 25 kg;
5. elementi della struttura di elevazione orizzontale, assemblati "a secco" con tecnica "a serraggio";
6. elementi della struttura di elevazione orizzontale, "saldati";
7. elementi della struttura di elevazione verticale.

Infine, per ciascuna categoria, attraverso la visione di filmati corrispondenti a casi reali, sono stati determinati i secondi complessivi per il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro o su autoarticolato, quest'ultimi suddivisi in quattro classi:

- T0, secondi necessari per il collegamento tra il singolo elemento o il gruppo di elementi ed il gancio dell'apparecchio di sollevamento;
- T1, secondi necessari per il trasporto del singolo elemento o del gruppo di elementi dalla collocazione in opera alla posizione utile per il tiro in alto;
- T2, secondi necessari per il trasporto del singolo elemento o del gruppo di elementi dalla posizione utile per il tiro in alto ad un sito di stoccaggio temporaneo in cantiere;
- T3, secondi necessari per il caricamento del singolo elemento o del gruppo di elementi su un autocarro o su un autoarticolato

A questo punto, noti i tempi di funzionamento di strumenti, macchinari e apparecchi di sollevamento utilizzati, è possibile stimare l'aliquota di emissioni di CO_{2eq1}.

| | | | |
|--------------------------|--|---|---|
| CO_{2eq1} | Emissioni di CO _{2eq} , generate da strumenti e macchinari utilizzati per la rimozione delle connessioni | + | Emissioni di CO _{2eq1} generate da macchinari utilizzati per il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro |
|--------------------------|--|---|---|

Emissioni di CO_{2-eq,1} generate da strumenti e macchinari utilizzati per la rimozione delle connessioni

| Strumento o macchinario | = | Secondi di funzionamento | x | Numero totali di connessioni rimosse | x | Potenza o consumo | x | Fattore di emissione | = | Emissioni di CO _{2-eq} |
|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------------------|---|-------------------------------------|---|------------------------------------|---|---------------------------------|
| Avvitatore ad impulsi | = | s | x | n | x | 0,114 kWh | x | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | = | kg CO _{2-eq} |
| Trapani avvitatori | = | s | x | n | x | 0,066 kWh | x | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | = | kg CO _{2-eq} |
| Taglio al plasma manuale | = | s | x | n | x | 15,4 kW | x | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | = | kg CO _{2-eq} |
| Piattaforma verticale | = | s | x | n | x | 2,04 kWh | x | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | = | kg CO _{2-eq} |
| Escavatori | = | h/m ³ | x | m ³ | x | Dipende dall'entità dell'intervento | x | 3,17 kg CO _{2-eq} /l | = | kg CO _{2-eq} |

| | | | | | |
|---------------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Martelli demolitori | h/m ³ | m ³ | 2,07 kW (cls) 1,3 kW (laterizi) | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|---------------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|

Emissioni di CO_{2-eq, 1} generate da macchinari utilizzati per il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro

| | | | | | | | | | | |
|-------------|---|--------------------------|---|-------------------------|---|-------------------|---|----------------------|---|---------------------------------|
| Macchinario | = | Secondi di funzionamento | x | Numero totali di viaggi | x | Potenza o consumo | x | Fattore di emissione | = | Emissioni di CO _{2-eq} |
|-------------|---|--------------------------|---|-------------------------|---|-------------------|---|----------------------|---|---------------------------------|

| | | | | | |
|---------------------|---|---|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Autogrù telescopica | s | n | Dipende dall'entità dell'intervento | 3,17 kg CO _{2-eq} /l | kg CO _{2-eq} |
|---------------------|---|---|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|

| | | | | | |
|-------------------------|---|---|---------|----------------------------------|-----------------------|
| Sollevatore telescopico | s | n | 5,1 l/h | 3,17 kg CO _{2-eq} /l | kg CO _{2-eq} |
|-------------------------|---|---|---------|----------------------------------|-----------------------|

| | | | | | |
|-----------------------|---|---|-----------|------------------------------------|-----------------------|
| Piattaforma semovente | s | n | 18,72 kWh | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|-----------------------|---|---|-----------|------------------------------------|-----------------------|

*Fattore di emissione: 0,28 kg CO_{2-eq}/kWh – Fonte: ISPRA [224]

*Fattore di emissione: 3,17 kg CO_{2-eq}/l – Fonte: GHG information for transport services [225]

CO_{2eq2}, aliquota di emissioni prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione

Le attività di demolizione possono generare uno sfrido, ovvero una percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato. L'aliquota di emissioni di CO_{2eq2} corrisponde quindi alle emissioni incorporate nella percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato.

In primo luogo, è stata determinata la percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione. Si è calcolato l'indice di riutilizzabilità (vedi paragrafo Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita).

Nota la percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato, è possibile stimare l'aliquota di emissioni di CO_{2-eq,2}.

$$CO_{2eq2} = \text{Peso del materiale (kg)} \times \left[100\% - \text{Indice di riutilizzabilità (\%)} \right] \times \text{Embodied carbon del materiale (kg CO}_{2-eq}/\text{kg)}$$

CO_{2-eq, 3}, aliquota di emissioni prodotte dal trasporto fuori dal sito

La fase successiva alla conclusione della attività di demolizione prevede il trasporto dei rifiuti da demolizione in apposite aree di stoccaggio, in centri di riciclaggio o di smaltimento dei rifiuti.

I rifiuti da demolizione sono stati classificati in tre macrocategorie, di seguito elencate, al fine di definirne le destinazioni future e le tappe percorse dai mezzi di trasporto:

- elementi metallici della struttura di elevazione e delle partizioni inclinate; vi appartengono gli elementi della struttura di elevazione verticale (pilastri), orizzontale (travi, travetti), inclinata (controventi) e tutti gli elementi delle partizioni inclinate (travi, travi a ginocchio, pilastri);
- rifiuti da demolizione "non pericolosi"; vi appartengono tutti i materiali non rientranti nella prima categoria e non contrassegnati da un asterisco (*) all'interno dell'elenco europeo dei rifiuti [rif];
- rifiuti da demolizione "pericolosi" o "contaminati"; vi appartengono tutti i materiali non rientranti nella prima categoria, contrassegnati da un asterisco (*) all'interno dell'elenco europeo dei rifiuti, o materiali entrati a contatto con materiali "pericolosi" o sostanze contaminanti.

Poi a ciascuna macrocategoria, in funzione del tipo di materiale e dei possibili trattamenti richiesti prima della re-immissione nel ciclo produttivo, sono state assegnate possibili destinazioni future e possibili tappe percorse dai mezzi di trasporto. Gli elementi metallici della struttura di elevazione, nel caso di future attività di riutilizzo, prima di essere reimmessi in commercio necessitano di attività di pre – lavorazione (taglio, foratura, sabbiatura, zincatura, verniciatura).

Per l'acciaio, gli impianti in grado di fornire tali attività sono i centri di trasformazione, conformi alla UNI EN ISO 9001:2015, ovvero impianti esterni alla fabbrica o al cantiere, che ricevono dal produttore di acciaio elementi base e confezionano elementi direttamente impiegabili in cantiere. Un mezzo di trasporto in uscita dal cantiere di demolizione ha quindi come prima destinazione un centro di trasformazione. Dall'osservazione di 20 centri, situati sul territorio campano e lombardo, individuati attraverso la piattaforma Sicurnet.2 [226], è però emersa l'incapacità da parte di un centro di trasformazione di fornire attività di sabbiatura e zincatura (18 centri su 20 non sono dotati di impianti di zincatura). Per tale motivo, un mezzo di trasporto in uscita da un centro di trasformazione ha come seconda destinazione un impianto di zincatura. Completato il rifacimento del sistema di protezione alla corrosione, gli elementi metallici ritornano al centro di trasformazione al fine di essere stoccati per un nuovo progetto di costruzione.

Nel caso di rifiuti da demolizione non pericolosi un mezzo di trasporto in uscita dal cantiere di demolizione, nel caso di future attività di riciclaggio, ha come unica destinazione un centro di riciclaggio. Nel caso di future attività di riutilizzo, invece, un mezzo di trasporto in uscita dal cantiere di demolizione ha come unica destinazione centri gestiti da rivenditori professionisti di materiali da costruzione provenienti da attività di demolizione. Quest'ultimi, oltre a fornire aree per lo stoccaggio, forniscono attività di pulizia e consulenze specializzate. Una panoramica di rivenditori professionisti che vendono materiali da costruzione provenienti da vecchi edifici smantellati è offerta da piattaforme digitali.

Nel caso di attività smaltimento dei rifiuti un mezzo di trasporto in uscita dal cantiere di demolizione ha come unica destinazione un centro di smaltimento dei rifiuti.

Emissioni di CO_{2-eq} generate dall'utilizzo di macchinari per il trasporto fuori dal sito

| Mezzo utilizzato | = | Distanza percorsa | x | Numero di viaggi | x | Fattore di emissione | = | Emissioni di CO _{2-eq} |
|---------------------------------------|---|-------------------|---|------------------|---|------------------------------------|---|---------------------------------|
| Autoarticolato per trasporti speciali | | km | | n | | 0,939 kg CO _{2-eq} /km | | kg CO _{2-eq} |
| Autoarticolato | | km | | n | | 0,751 kg CO _{2-eq} /km | | kg CO _{2-eq} |
| Autocarro a 3 assi | | km | | n | | 0,676 kg CO _{2-eq} /km | | kg CO _{2-eq} |
| Autocarro | | km | | n | | 0,286 kg CO _{2-eq} /km | | kg CO _{2-eq} |

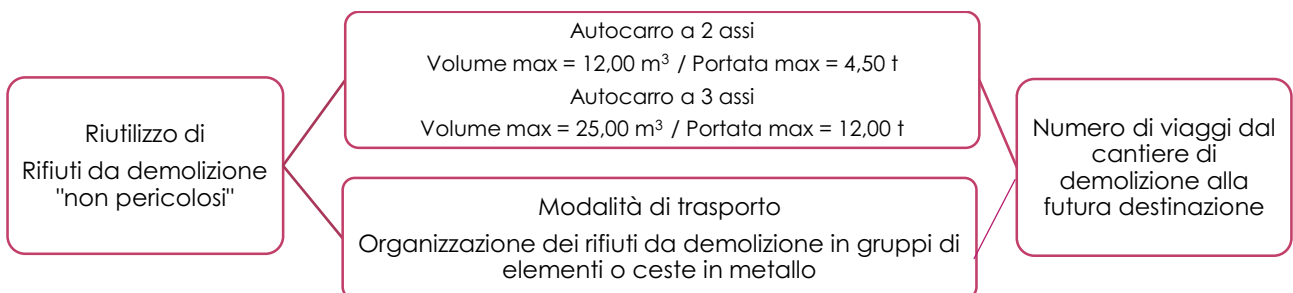
Per il trasporto di elementi metallici il numero di viaggi è influenzato dalle modalità di trasporto adottate e dalla tipologia di mezzo di trasporto utilizzato come riportato di seguito:



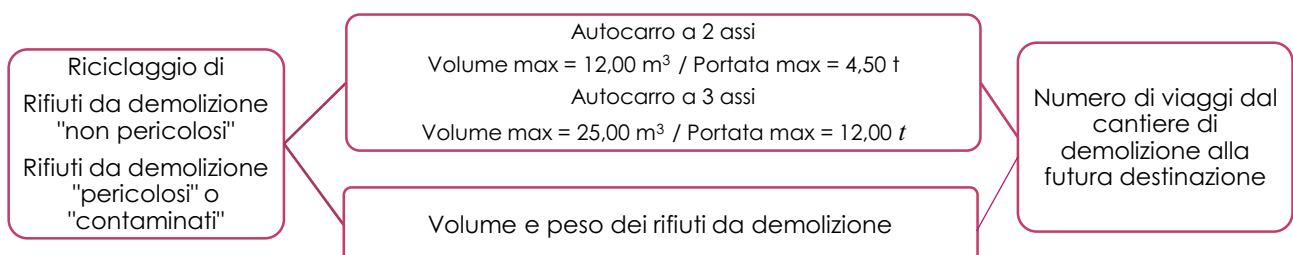
La tipologia di mezzo di trasporto scelta, generalmente utilizzata per il trasporto di elementi metallici, è l'autoarticolato. Nota la capacità del mezzo di trasporto (lunghezza, volume e portata massima trasportabile), attraverso linee guida per la consegna e lo scarico di prodotti in acciaio [227], è stata definita la modalità di trasporto. Quest'ultima prevede la redazione di un inventario degli elementi in acciaio da trasportare il quale consente la formazione ed il successivo caricamento sull'autoarticolato di gruppi di elementi formati dalla sovrapposizione di più elementi, quest'ultimi caratterizzati dalla stessa serie (es. IPE) e dalle stesse dimensioni.

Nota la capacità del mezzo di trasporto ed il peso e il volume occupato dai singoli gruppi di elementi, il numero di viaggi è ottenuto attraverso la determinazione del numero di autoarticolati che, in seguito al caricamento graduale di singoli gruppi di elementi, raggiungono la portata o il volume massimo trasportabile.

Per il trasporto di rifiuti da demolizione "non pericolosi", dal cantiere di demolizione a rivenditori professionisti, le modalità di trasporto adottate e la definizione del numero di viaggi coincidono con quelli definiti per il trasporto degli elementi metallici. Le uniche differenze risiedono nella tipologia di mezzo di trasporto scelta come riportato di seguito:



Per il trasporto di rifiuti da demolizione "non pericolosi", dal cantiere di demolizione ad un centro di riciclaggio, e per il trasporto di rifiuti da demolizione "pericolosi" o "contaminati", dal cantiere di demolizione ad un centro di smaltimento dei rifiuti, il numero di viaggi è influenzato dal volume e dal peso dei rifiuti da demolizione.



Il numero di viaggi è ottenuto attraverso la determinazione del numero di autocarri che, in seguito al caricamento di frazioni di materiale, raggiungono la portata o il volume massimo trasportabile.

A questo punto, nota la tipologia di mezzo di trasporto utilizzato e definito il numero di viaggi dal cantiere di demolizione alla futura destinazione, è possibile stimare l'aliquota di emissioni di CO_{2-eq,3} prodotte dal trasporto fuori dal sito.

$$\text{CO}_{2\text{eq}3} = \text{Distanza percorsa (km)} \times \text{Numero di viaggi (n)} \times \text{Fattore di emissione (kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{km)}$$

CO_{2eq,4}, aliquota di emissioni prodotte da attività di trasformazione per successivo riutilizzo

Gli **elementi metallici** della struttura di elevazione, prima di essere reimmessi in commercio, necessitano di attività di trasformazione necessarie per il raggiungimento di requisiti progettuali e prestazionali. Gli impianti in grado di fornire tali attività, come visto, sono i centri di trasformazione, i quali si affidano ad impianti di zincatura per la realizzazione di sistemi di protezione alla corrosione.

Le attività di trasformazione state classificate in due macrocategorie:

- attività di trasformazione eseguite presso un centro di trasformazione;
- attività di trasformazione eseguite presso un impianto di zincatura.

Per ciascuna macrocategoria, sono state determinate le tipologie di attività eseguite e i macchinari utilizzati.

Le attività di trasformazione eseguite presso un centro di trasformazione ed i macchinari utilizzati, di seguito elencati sono stati determinati attraverso l'osservazione dei servizi offerti da centri di trasformazione localizzati sul territorio italiano:

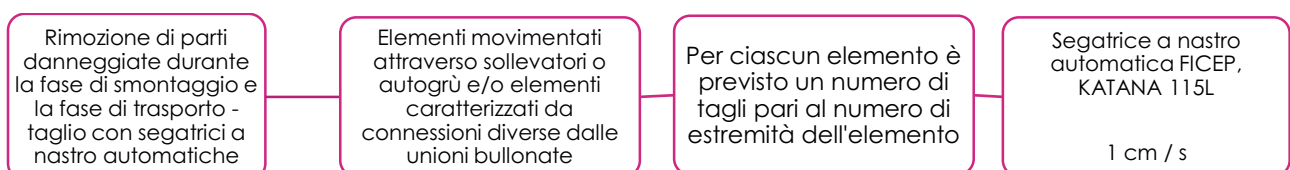
- Rimozione di parti danneggiate durante la fase di smontaggio e di trasporto - taglio con segatrici a nastro automatiche;
- Rimozione di porzioni di materiale forato - taglio con segatrici a nastro automatiche;
- Rimozione di parti saldate - taglio con segatrici a nastro automatiche;
- Rimozione delle imperfezioni superficiali generate dal procedimento di taglio al plasma manuale - taglio con segatrici a nastro automatiche.

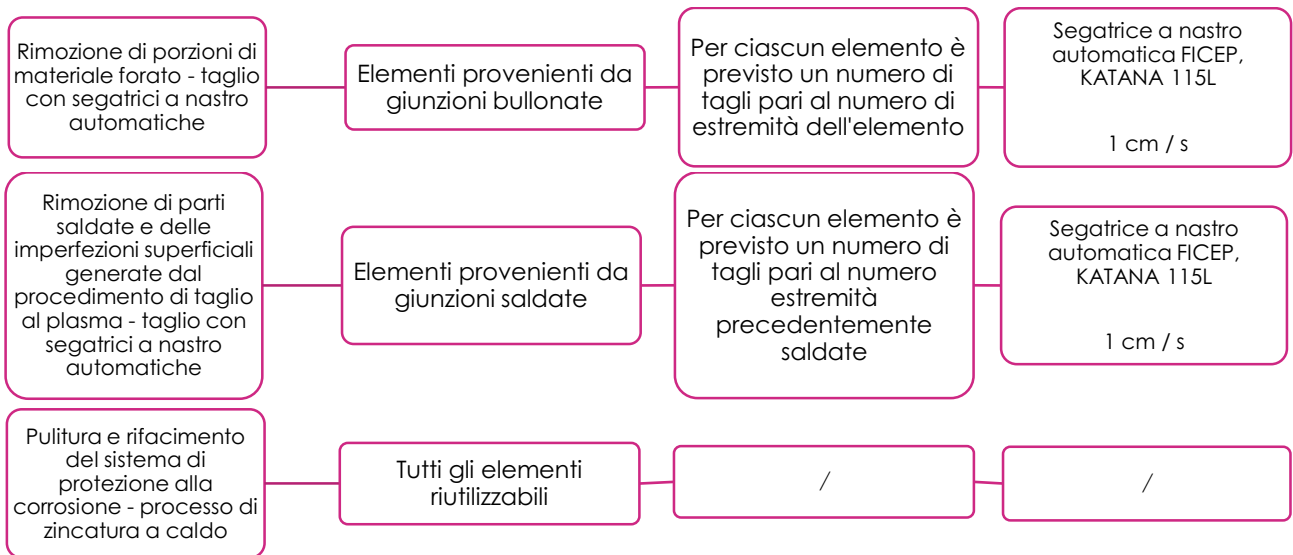
Le attività di trasformazione eseguite presso un impianto di zincatura, di seguito elencate, sono state determinate attraverso l'osservazione dei servizi offerti da impianti di zincatura localizzati sul territorio italiano:

- Pulitura e rifacimento del sistema di protezione alla corrosione
- processo di zincatura a caldo: sgrassaggio, spazzolatura e decapaggio, immersione nello zinco fuso

A questo punto, ciascuna attività di trasformazione è stata definita:

- la tipologia di elementi da sottoporre alle diverse attività;
- il numero di operazioni da eseguire per un singolo elemento;
- i secondi necessari per l'esecuzione di una singola operazione e il modello dei macchinari utilizzati.





Anche gli **elementi in legno** di una struttura di elevazione (pannelli X-LAM, pannelli portanti e travi) necessitano di attività di trasformazione/trattamento prima di essere reintrodotti nel mercato.

Il primo passo è quindi la determinazione delle suddette attività e dei macchinari con cui vengono effettuate:

- rimozione di porzioni di materiale forato a causa di precedenti unioni chiodate e/o avvitate e obsolescenza fisica, utilizzando una sega circolare automatica;
- asportazione di materiale superfluo per rendere la superficie perfettamente liscia e piatta, utilizzando una pialla elettrica;
- trattamento impregnante per proteggere e/o colorare il legno e che penetra nella porosità dell'oggetto trattato, senza formare una pellicola, utilizzando una pistola a spruzzo.

Velocità necessaria per effettuare le operazioni

| Macchinari | Modello | velocità (m/s) |
|--|--|-------------------------|
| sega da banco circolare | BOSCH - GTS 10 XC PROFESSIONAL | 0,017 |
| Centro di lavoro a controllo numerico - sega | BIESSE - Uniteam UT | 0,14 |
| Pialla elettrica | FORMAT 4 - plan 51 L | 0,033 |
| Dispositivo a spruzzo | WAGNER - Airless Sprayer Control Pro 350 M | 7,5 m ² /min |

Infine, note le attività di trasformazione, il numero di operazioni da eseguire ed i secondi necessari per l'esecuzione di una singola operazione, è possibile stimare l'aliquota di emissioni di CO_{2eq4} generata da attività di trasformazione:

$$\text{CO}_{2eq4} = \begin{array}{c} \text{Emissioni di CO}_{2eq4} \\ \text{generate da attività di trasformazione} \\ \text{eseguite presso un centro di} \\ \text{trasformazione} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Emissioni di CO}_{2eq4} \\ \text{generate da attività di trasformazione} \\ \text{eseguite presso impianti di zincatura} \end{array}$$

Emissioni di CO_{2-eq} prodotte dalle attività di trasformazione per successivo riutilizzo (elementi in legno)

$$\text{Attività di trasformazione} = \text{Dimensioni dell'elemento} \times \text{Numero di attività} \times \text{Velocità} \times \text{Potenza} \times \text{Fattore di emissione} = \text{Emissioni di CO}_{2\text{-eq}}$$

| | | | | | | |
|------------------------------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|
| Taglio con sega da banco circolare | m | n | h/m | 2,1 kW | 0,44 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|------------------------------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|

| | | | | | | |
|-------------------------------------|---|---|-----|-------|------------------------------------|-----------------------|
| Taglio con sega elettrica circolare | m | n | h/m | 22 kW | 0,44 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|-------------------------------------|---|---|-----|-------|------------------------------------|-----------------------|

| | | | | | | |
|------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|
| Piallatura | m | n | h/m | 5,5 kW | 0,44 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|

| | | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|
| Trattamento impregnante a spruzzo | m | n | h/m | 0,6 kW | 0,44 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|-----------------------------------|---|---|-----|--------|------------------------------------|-----------------------|

Emissioni di CO_{2-eq, 4} generate da attività di trasformazione eseguite presso un centro di trasformazione (elementi metallici)

$$\text{Attività di trasformazione} = \text{Secondi di funzionamento} \times \text{Dimensioni dell'elemento} \times \text{Potenza dello strumento o del macchinario} \times \text{Fattore di emissione} = \text{Emissioni di CO}_{2\text{-eq}}$$

| | | | | | |
|-------------------------------|-----|---|-------|------------------------------------|-----------------------|
| Taglio con segatrici a nastro | m/s | m | 15 kW | 0,28 kg CO _{2-eq} /kWh | kg CO _{2-eq} |
|-------------------------------|-----|---|-------|------------------------------------|-----------------------|

Emissioni di CO_{2-eq, 4} generate da attività di trasformazione eseguite presso un impianto di zincatura (elementi metallici)

$$\text{Attività di trasformazione} = \text{Peso dell'elemento} \times \text{Fattore di emissione} = \text{Emissioni di CO}_{2\text{-eq}}$$

| | | | |
|----------------------------|----|------------------------------------|-----------------------|
| Processo zincatura a caldo | kg | 0,259 kg CO _{2-eq} /kg | kg CO _{2-eq} |
|----------------------------|----|------------------------------------|-----------------------|

*Fattore di emissione: 0,259 kg CO_{2eq}/kg – Fonte: American Galvanizers Association [228]

Aliquota negativa di CO_{2eq5} quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale

Come precedentemente detto, gli alberi, in quanto organismi viventi, assorbono dall'atmosfera anidride carbonica, la trasformano in carbonio e rilasciano ossigeno nell'ambiente. Per questo motivo le opere edili in legno rappresentano una preziosa riserva di carbonio, gli elementi in legno sono infatti in grado di immagazzinare CO₂ che verrà restituita all'ambiente con il loro incenerimento, ovvero quando per essi non è possibile un ulteriore ciclo di vita.

Uno studio della Aalto University, afferma che ad influenzare la quantità totale di stoccaggio del carbonio fornita dalla costruzione di edifici in legno è il volume di legno contenuto

nell' edificio [229]. Pertanto, il potenziale stoccaggio del carbonio degli edifici in legno non è principalmente correlato al tipo di edificio, al tipo di legno o alle dimensioni dell'edificio, ma si basa sul numero e sul volume dei componenti in legno in questi edifici: più legno più stoccaggio di CO₂.

Grazie a questa sua caratteristica, l'aliquota di CO_{2eq5} relativa allo stoccaggio del materiale, è un'aliquota negativa che riduce le emissioni totali.

Viene calcolata come il prodotto tra il peso dello sfido degli elementi in legno e l'Embodied Carbon netto fornito dall'ICE, ottenuto come la differenza tra il valore di EC che include lo stoccaggio di carbonio e il valore di EC che non include lo stoccaggio di carbonio.

Viene considerato il peso dello sfido piuttosto che il peso totale degli elementi in legno in considerazione del fatto che lo sfido verrà avviato ad operazioni di incenerimento per produzione di energia con conseguente rilascio della CO₂ stoccata, mentre gli elementi riutilizzati e riciclati continueranno a trattenere la quota di CO₂ immagazzinata.

$$CO_{2eq5} = \text{Peso sfido elementi in legno} \times \text{Embodied Carbon netto dell'elemento in legno}$$

E quindi, la formula alla base della metodologia applicata per la stima delle emissioni diventa (per la tipologia costruttiva in legno):

$$\sum CO_{2eq} = CO_{2eq1} + CO_{2eq2} + CO_{2eq3} + CO_{2eq4} - CO_{2eq5}$$

DESCRIZIONE DELLE SOLUZIONI A SECCO

In questo capitolo si riporta, per maggiore completezza, una panoramica delle principali tecnologie costruttive esistenti con le relative unità tecnologiche delle soluzioni a secco in acciaio e in legno. Per la redazione di questo capitolo sono stati consultati Manuali tecnici e Atlanti [230] [231] [232] [233].

SOLUZIONI A SECCO DI TIPO METALLICO

Chiusura superiore – Coperture

La copertura di un sistema costruttivo in acciaio è solitamente caratterizzata da:

- un sistema “a umido” costituito da un solaio composito con lamiera grecata e caldana in CIs (fig. 20 a sinistra), realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di uno strato di lamiere grecate, aventi in genere un'altezza pari a 45 – 80 mm, di reti metalliche, con funzione di ripartizione dei carichi, seguite da un getto di cls; la lamiera grecata, in questo caso, assolve sia la funzione di cassero autoportante durante la fase di getto sia una funzione strutturale, collaborando con il CIs; il solaio viene generalmente completato con la posa in opera di pannelli di materiale isolante, seguiti dalla realizzazione di un massetto per la posa in opera di una membrana impermeabilizzante o di una pavimentazione;

- un sistema “a umido” costituito da un solaio composito con pannelli prefabbricati in CIs e caldana in CIs (fig. 20 a destra) realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di pannelli prefabbricati in CIs, pieni o alveolari, di reti metalliche, con funzione di ripartizione dei carichi, seguite da un getto di cls; il solaio viene generalmente completato con la posa in opera di pannelli di materiale isolante, seguiti dalla realizzazione di un massetto per la posa in opera di una membrana impermeabilizzante o di una pavimentazione;

– un sistema assemblato a secco con tecnica “a serraggio” costituito da un solaio con lamiera grecata (fig. 20 in basso), realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di uno o più strati di lamiere grecate in abbinamento a pannelli di materiale isolante o pannelli coibentati metallici, seguiti dalla posa in opera di una membrana impermeabilizzante.

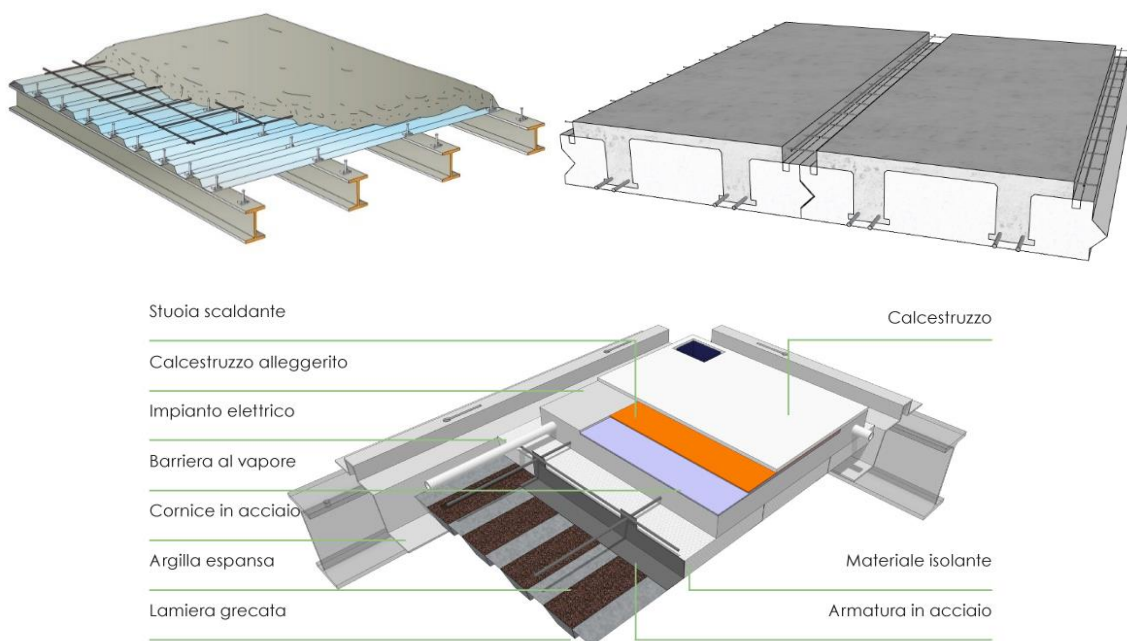


FIG.20 DETTAGLI COSTRUTTIVI SISTEMA CHIUSURA ORIZZONTALE IN ACCIAIO O ACCIAIO-MISTO

Partizione interna verticale – Pareti interne verticali

Le pareti interne verticali di un sistema costruttivo in acciaio sono solitamente caratterizzate da pareti leggere “a secco” o pareti pesanti “a secco” o “a umido”. Le pareti leggere “a secco” sono caratterizzate da un'orditura metallica di supporto, realizzata con profili di acciaio sagomati a freddo, rivestita con pannelli di materiale isolante e/o lastre di cartongesso o altro materiale, nel caso di pareti interne opache, o con lastre di vetro nel caso di pareti interne trasparenti. Le pareti pesanti “a secco” sono caratterizzate da pannelli prefabbricati in cemento mentre le pareti pesanti “a umido” sono caratterizzate da laterizi forati rivestiti con lastre di cartongesso o altro materiale.

Partizione interna verticale – Elementi di protezione

Gli elementi di protezione (parapetti) sono solitamente caratterizzati da un sistema di montanti e traversi assemblato “a secco” con tecnica “a serraggio” realizzato mediante la posa in opera di montanti e traversi in acciaio o altro materiale.

Partizione interna verticale – Infissi interni verticali

Gli infissi interni verticali, compatibilmente con la classificazione effettuata dalla norma UNI 8369, la quale fornisce un'ulteriore scomposizione degli elementi tecnici che compongono le partizioni interne verticali, sono distinti, in funzione del loro cinematismo, in porte interne a rotazione e porte interne scorrevoli. Quest'ultime sono caratterizzate da un telaio e da una o più ante in legno, acciaio, alluminio, PVC o materiali misti.

Chiusura verticale – Pareti perimetrali verticali

Le pareti perimetrali verticali di un sistema costruttivo in acciaio sono solitamente caratterizzate da:

- tamponature in pannelli metallici coibentati (fig. 21 a sinistra), realizzate con pannelli di tipo sandwich, costituiti da un'anima in schiuma poliuretanicca e rivestimento in lamiera d'acciaio zincata, applicati su un'intelaiatura metallica realizzante mediante un sistema di piastre, di elementi verticali (montanti) e orizzontali (traversi), a singola o doppia orditura;
- sistemi curtain wall (fig. 21 a destra), costituiti da pannelli di chiusura preassemblati, fissi e/o apribili, traslucidi e/o opachi, applicati su un'intelaiatura metallica realizzata mediante un sistema di piastre, di elementi verticali (montanti) e orizzontali (traversi), a singola o doppia orditura.

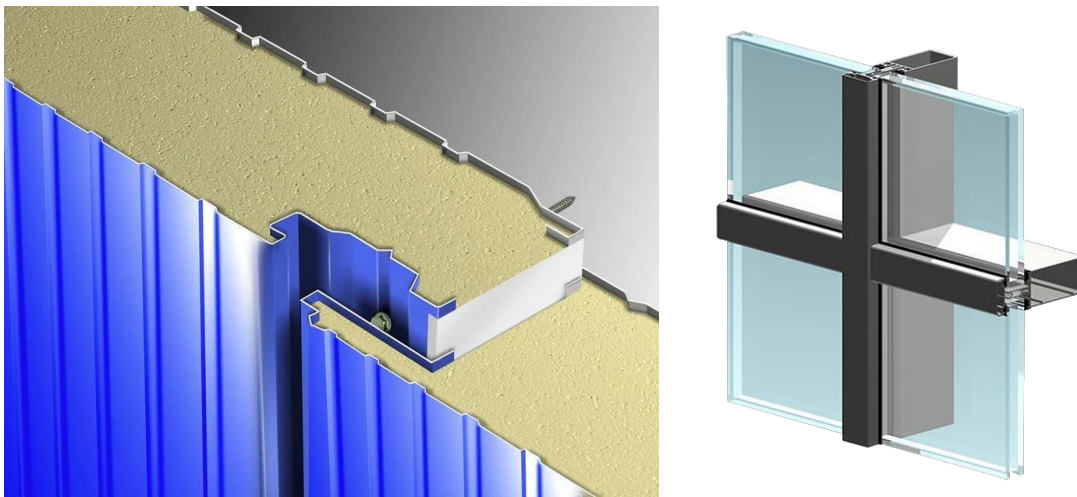


FIG. 21 DETTAGLI DI CHIUSURE VERTICALI IN ACCIAIO

Chiusura verticale – Infissi esterni verticali

Gli infissi esterni verticali, compatibilmente con la classificazione effettuata dalla norma UNI 8369, la quale fornisce un'ulteriore scomposizione degli elementi tecnici che compongono le chiusure verticali, sono distinti, in base alla funzione svolta, in finestre e portefinestre. Le finestre sono a loro volta distinte, in funzione del loro cinematismo, in finestre ad anta fissa, a battente, a vasistas, a visiera o scorrevoli. Le portefinestre, invece, sono a loro volta distinte, in funzione del loro cinematismo, in portefinestre a battente o scorrevoli. Esse sono caratterizzate da un telaio in legno, acciaio e alluminio, PVC o materiali misti e da lastre di vetro.

Struttura di elevazione – Strutture di elevazione verticali, orizzontali, inclinate

In un sistema costruttivo in acciaio le funzioni portanti sono assicurate attraverso la realizzazione di un sistema assemblato "a secco" con tecnica "a serraggio" o "saldato".

I pilastri, rappresentativi della struttura di elevazione verticale, sono generalmente realizzati con profili in acciaio laminati a caldo, caratterizzati da sezioni HEA, HEB, HEM, circolari, cavi o compositi (aggiunta di un getto di CIs).

Le travi, rappresentative della struttura di elevazione orizzontale, sono generalmente realizzate con profili in acciaio laminati a caldo, caratterizzato da sezioni IPE, HEA, HEB, HEM, con anima piena o forata (presenza di fori per il passaggio di condotti).

I controventi, rappresentativi della struttura di elevazione inclinata, i quali conferiscono una stabilità nei confronti di azioni orizzontali, sono generalmente realizzati con profili in acciaio laminati a caldo o con cavi in acciaio.

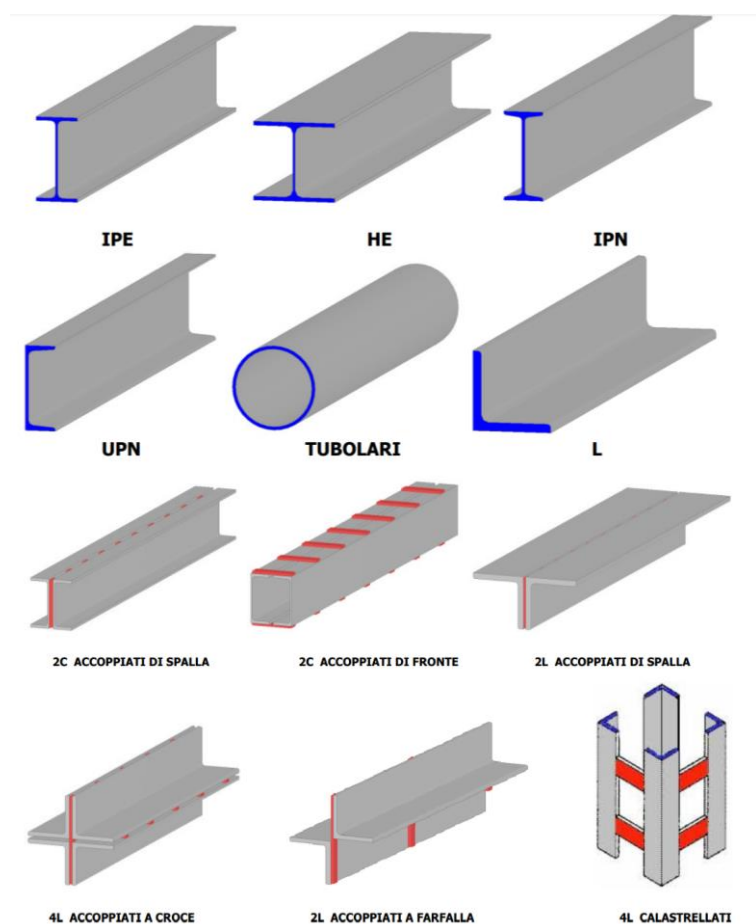


FIG. 22 PROFILI IN ACCIAIO PER STRUTTURE INTELAIATE

Partizioni interna ed esterna inclinata – Scale interne ed esterne

Le scale interne di un sistema costruttivo in acciaio sono solitamente caratterizzate da un sistema di travi assemblate “a secco” con tecnica “a serraggio” o “saldate”, realizzato mediante l'unione di travi orizzontali (UPN, IPE, HE), per i pianerottoli, e travi sagomate a ginocchio (UPN, IPE, HE) per le rampe. Le scale esterne di un sistema costruttivo in acciaio, invece, sono solitamente caratterizzate da un sistema assemblato “a secco” con tecnica “a serraggio” o “saldate”, realizzato mediante la posa in opera di pilastri (sezione circolare, HE) e l'unione di travi orizzontali (UPN, IPE, HE), per i pianerottoli, e travi sagomate a ginocchio (UPN, IPE, HE) per le rampe.

Partizione esterna orizzontale – Balconi e logge

I balconi e le logge di un sistema costruttivo in acciaio sono solitamente caratterizzati da un sistema di travi e travetti assemblati “a secco” con tecnica “a serraggio” o “saldati”, realizzato mediante la posa in opera di travi e travetti, collegati alla struttura di elevazione. I balconi e le logge vengono generalmente completate con un sistema di montanti e traversi, in acciaio o altro materiale, il quale costituisce l'elemento di protezione.

Partizione interna orizzontale e Chiusura orizzontale inferiore – Solai e Solai a terra

Un solaio, interpiano o a terra, di un sistema costruttivo in acciaio è solitamente caratterizzato da:

- un sistema “a umido” costituito da un solaio composito con lamiera grecata e caldana in CIs,(figura), realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di uno strato di lamiere grecate, aventi in genere un'altezza pari a 45 – 80 mm, di reti metalliche,

con funzione di ripartizione dei carichi, seguite da un getto di cls; il solaio viene generalmente completato con la posa in opera di pannelli di materiale isolante, seguiti dalla realizzazione di un massetto per la posa in opera di una pavimentazione;

– un sistema “a umido” costituito da un solaio composito con pannelli prefabbricati in Cls e caldana in Cls, (figura), realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di pannelli prefabbricati in Cls, pieni o alveolari, di reti metalliche, con funzione di ripartizione dei carichi, seguite da un getto di cls; il solaio viene generalmente completato con la posa in opera di pannelli di materiale isolante, seguiti dalla realizzazione di un massetto per la posa in opera di una pavimentazione;

– un sistema assemblato “a secco” con tecnica “a serraggio” costituito da un solaio “dry floor” (figura), realizzato mediante l'applicazione, sull'orditura metallica portante, di uno strato di lamiera grecate, con funzione di trasferimento dei carichi, seguite da pannelli in legno; il solaio viene generalmente completato con la posa in opera di lastre di fibrocemento e fogli di isolante termico e di una pavimentazione.

SOLUZIONI A SECCO IN LEGNO

Il legno più usato nel campo edilizio è il genere delle conifere, in primis l'abete rosso. Per la loro facilità di lavorazione, reperimento ed economicità. Oggi, le tecnologie costruttive in legno più utilizzate sono (in ordine cronologico di utilizzo):

- Blockbau
- Platform frame
- Telaio
- Xlam o Cross lam o CLT (Cross Laminated Timber)

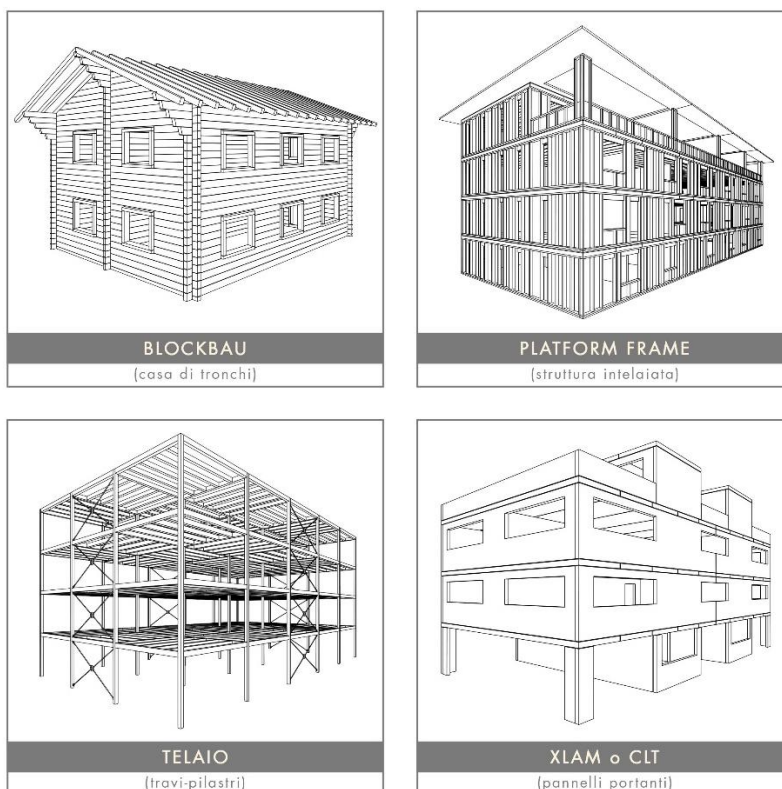


FIG. 23 IMMAGINE RIASSUNTIVA DEI PRINCIPALI SISTEMI COSTRUTTIVI IN LEGNO

BLOCKBAU o Blockhaus: casa di tronchi

Uno dei più antichi metodi costruttivi in legno. Si sovrappongono tronchi in legno fino a formare delle pareti. L'incastro viene realizzato negli angoli, attraverso degli incassi tra le assi che donano rigidità alla struttura. I tipi più diffusi di nodo d'angolo sono due:

- nodo "a croce" (o standard)
- nodo "a coda di rondine"

Gli elementi costruttivi attualmente presenti sul mercato sono tondi o squadrati, con un ampio range di rifiniture.

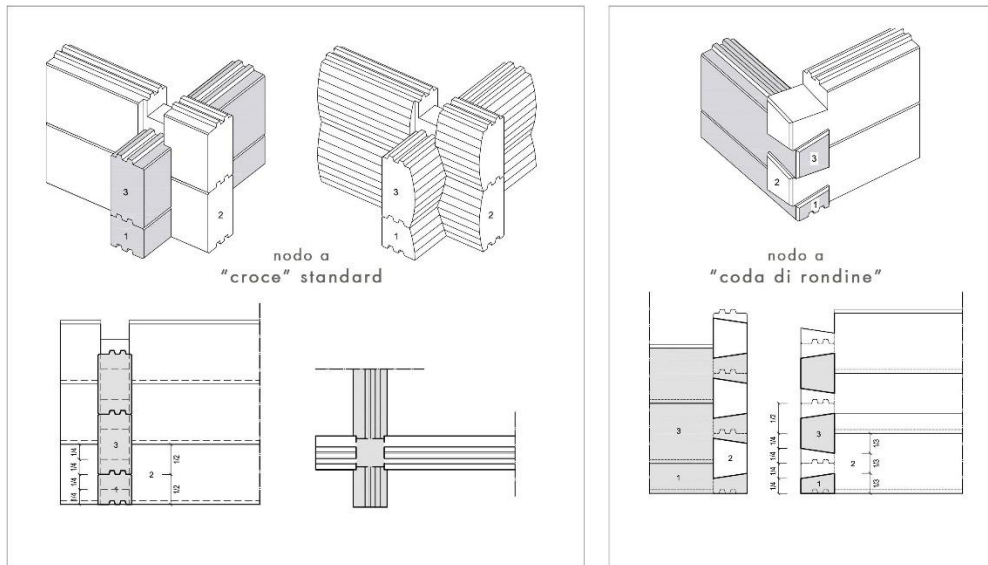


FIG. 24 IMMAGINE ESPLICATIVA DEI SISTEMI A INCASTRO DEI TRONCHI IN LEGNO DEL SISTEMA BLOCKBAU

PLATFORM FRAME: struttura intelaiata (o a traliccio)

È un metodo costruttivo leggero, che ha la possibilità di essere realizzato direttamente in cantiere o preassemblato in fabbrica comprensivo di infissi, per poi essere posto in opera velocemente.

Elementi costitutivi del sistema Platform Frame, sono una moltitudine di travetti che, a seconda della loro posizione, sono denominati montanti (verticali) e traversi (orizzontali). La loro unione genera lo scheletro di una parete, poi chiusa per mezzo di pannelli OSB chiodati o avvitati al telaio e che hanno la funzione statica di controventamento. Gli interstizi tra i travetti sono ottimi per ospitare materiale isolante ed avere così un pacchetto parete completo. La forza di questo sistema consiste infatti nella totale capacità di prefabbricazione. In fabbrica viene realizzata una parete completa (3) con montanti e traversi (1) uniti tra loro e chiusi da due pannelli OSB o compensato o tavole (2), e isolante interno. Viene caricata su un camion (4) e condotta in cantiere. Qui avviene la posa in opera delle pareti (5a), solaio superiore (5b) e si prosegue con i livelli successivi (5c). L'edificio viene realizzato un piano alla volta. Una volta completato il piano e messo il solaio, sullo stesso vengono poste le pareti del piano superiore e così via.

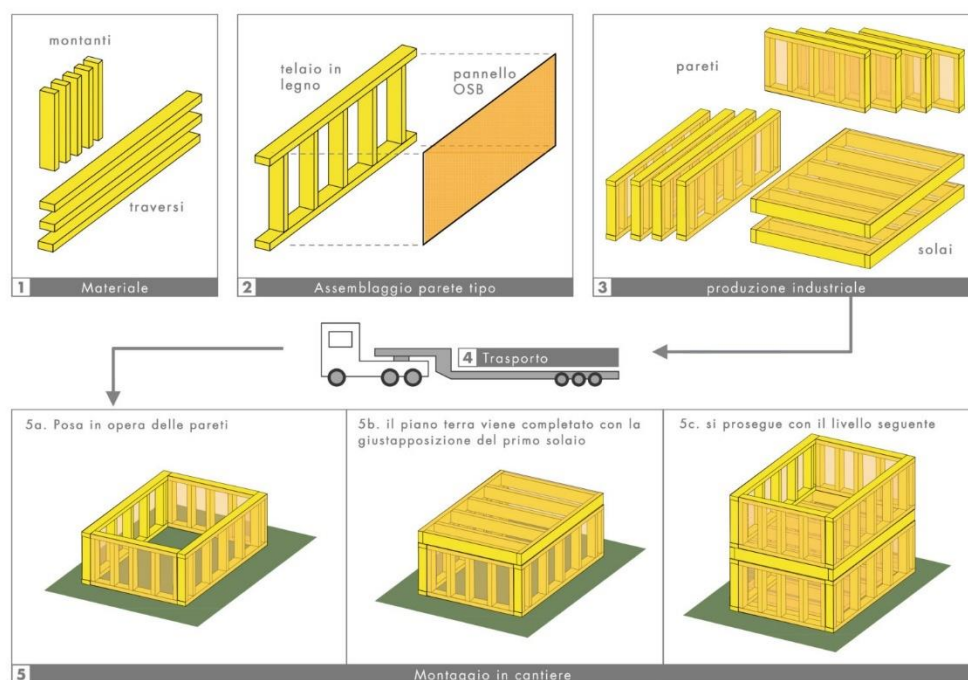


FIG.25 IMMAGINE RAPPRESENTANTE LE FASI DI ELEVAZIONE DEL SISTEMA FRAME

TELAIO: struttura travi e pilastri

La struttura in legno a telaio è realizzata con travature in legno massiccio o lamellare che svolgono la funzione di trave o di pilastro. Gli elementi lignei possono essere uniti tra loro in due modi, attraverso connessioni:

- a tutto legno
- metalliche

Chiusura superiore – Coperture

La copertura degli edifici intelaiati è solitamente realizzata con un'orditura di travi in legno lamellare con sovrastante perlinato, barriera al vapore, listelli in legno per l'alloggio dell'isolante, pannello isolante, pannello di chiusura in legno OSB, guaina impermeabile traspirante, listellatura di supporto per parete ventilata e manto di copertura (Fig.26).

Chiusura verticale – Pareti perimetrali e interne verticali

Nel sistema a pannelli intelaiati, il setto portante è costituito da un telaio leggero fatto di segati e rivestito con lastre a base di legno o gesso che hanno il compito di irrigidire e controventare il pannello. L'intercapedine che si forma all'interno è riempita con uno strato di isolante termico o acustico. Montanti e correnti vengono collegati tra loro mediante mezzi di collegamento semplici come graffe, viti e chiodi, il pannello di chiusura è collegato al telaio per mezzo di chiodi a aderenza migliorata e i pannelli sono tra loro giuntanti attraverso i fogli di rivestimento in corrispondenza di un montante (fig. 27). Allo stesso modo, le pareti interne intelaiate sono costituite da un'uguale stratigrafia a destra e sinistra del pannello centrale composto da isolante acustico e lastre in gesso-fibra. La parete continua con un pannello isolante, seguito da un pannello di chiusura in legno e dalla finitura interna con lastra in cartongesso.

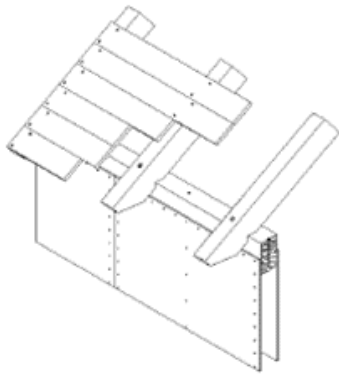


FIG. 26 COLLEGAMENTO PARETE-COPERTURA A TRAVETTI DI UN EDIFICIO INTELAIATO (FONTE: ASSOLEGNO)

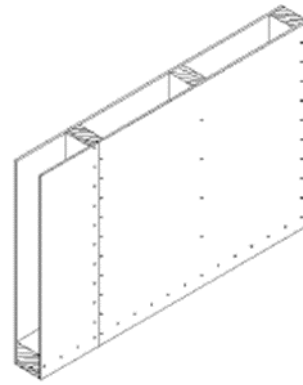


FIG.27 GIUNZIONE DEI FOGLI DI RIVESTIMENTO DI UNA PARETE INTELAIATA IN CORRISPONDENZA DI UN MONTANTE (FONTE: ASSOLEGNO)

Chiusura – chiusura verticale – pareti perimetrali verticali

Per le pareti perimetrali verticali in pannelli intelaiati la stratigrafia è la seguente: finitura interna con lastra in cartongesso, orditura metallica o in legno riempita con pannello isolante, pannello portante intelaiato con all'interno un telo di tenuta all'aria con funzione di controllo del vapore, secondo strato di isolante, finitura per cappotto su rasante con rete porta-intonaco nel caso di parete intonacata, oppure sottostruttura in alluminio di supporto al rivestimento e rivestimento nel caso di parete ventilata.

Infissi

Gli infissi sono caratterizzati da un telaio in legno, acciaio e alluminio, PVC o materiali misti e da lastre di vetro.

Chiusure orizzontali – Solai

Qualora il solaio venga realizzato con pannelli intelaiati, il collegamento segue lo stesso principio dei giunti tra pannelli intelaiati verticali, ovvero i fogli di rivestimento vengono chiodati in corrispondenza di un montante (Fig. 28). La struttura portante di un solaio intermedio di un edificio intelaiato può essere realizzata in due modi: con travi portanti a vista o con pannelli portanti intelaiati. Nel primo caso, alle travi portanti seguono: un pannello di chiusura in legno, isolamento acustico anti-calpestio, un telo di contenimento del sottofondo, il massetto alleggerito e la pavimentazione. Nel secondo caso, al telaio portante seguono un massetto alleggerito e il pavimento, mentre la finitura interna è realizzata con lastre in cartongesso.

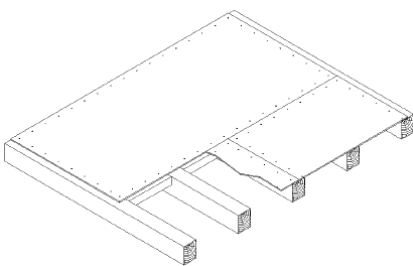
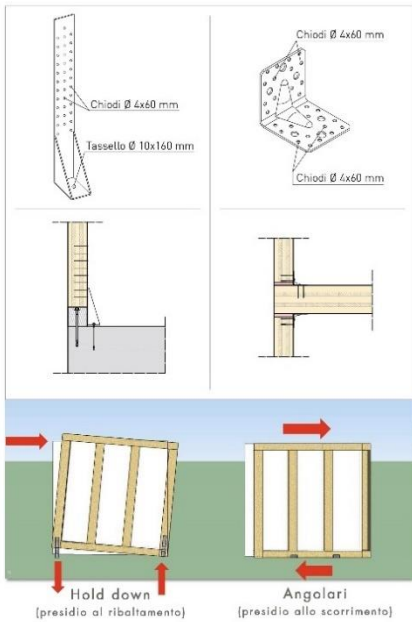


FIG.28 COLLEGAMENTO DI PIANO MEDIANTE FOGLI DI RIVESTIMENTO CHIODATI (FONTE: ASSOLEGNO)

In alternativa è possibile realizzare una copertura piana a terrazza che necessita di maggiori accortezze a causa della bassa pendenza che non agevola l'allontanamento delle acque meteoriche. In questo caso la stratigrafia è la seguente: orditura di travi in legno lamellare, perlinato, barriera al vapore, pannello isolante, telo di contenimento del getto, soletta debolmente armata, guaina impermeabile traspirante e infine la ghiaia.

XLAM (Cross-lam) o CLT (Cross Laminated Timber): a pannelli portanti



L'XLAM è un prodotto ligneo di recente invenzione. La sua origine risale ai primi anni 90 in Germania, per poi essere perfezionato in Italia, nei laboratori del CNR Ivalsa in collaborazione con l'università di Trento ed il Politecnico austriaco di Graz. Dopo anni di ricerche sono giunti alla messa a punto di un pannello multistrato in legno, che è la somma di tante lamelle affiancate e unite in modo incrociato a strati alterni. Possono essere da un numero di 3 ad un massimo di 9 stratificazioni.

L'XLAM, così come il Sistema Platform Frame, si distingue per le sue connessioni metalliche, progettate appositamente per resistere alle sollecitazioni sismiche. Sono di due tipi:

- Hold Down (o tirafondi)
- Angolari

FIG. 29 DETTAGLIO DELLE CONNESSIONI SISTEMA X-LAM

Chiusura – chiusura superiore – coperture

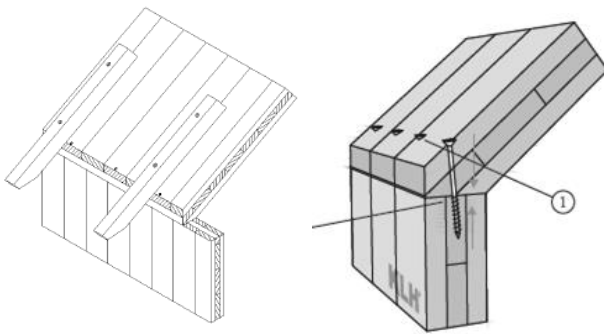


FIG.30 COLLEGAMENTO PARETE-COPERTURA CON SPORTI DI GRONDA REALIZZATE MEDIANTE FALSI TRAVETTI NEL CASO DI PANNELLI X-LAM (FONTE: ASSOLEGNO)

La copertura di un sistema costruttivo in legno può essere realizzata in modi differenti. quando la struttura portante è in pannelli X-LAM, le soluzioni adottate più ricorrenti sono il tetto piano a terrazza e la copertura inclinata ventilata. in entrambi i casi, partendo dall'intradosso, gli strati presenti sono: finitura interna in cartongesso, pannello isolante, pannello portante X-LAM, barriera al vapore e un secondo pannello isolante. quando la copertura è a terrazza, la struttura viene completata con un telo di contenimento del getto, una soletta debolmente armata, una guaina impermeabile traspirante e infine la ghiaia. Quando la copertura è inclinata ventilata, gli strati di chiusura sono la listellatura di supporto e il manto di copertura.

Il collegamento tra pannelli e pareti x-lam è in genere realizzato attraverso viti ed è possibile interrompere il pannello in corrispondenza della parete, realizzando lo sporto di gronda mediante dei falsi travetti (fig.30).

Struttura portante – struttura di elevazione – verticale

La struttura di elevazione verticale di edifici in legno è generalmente realizzata con pannelli portanti in X-LAM o con pannelli intelaiati, sistemi costruttivi più conosciuti e più diffusi. I pannelli in X-LAM sono realizzati in legno massiccio con strati di tavole incollati, sovrapposti ed incrociati in modo che l'andamento delle fibre sia ruotato di 90° rispetto allo strato sottostante. Il collegamento tra pareti allineate è realizzato in genere mediante giunto a mezzo legno avvitato (figura), oppure con tavole coprigiunto in compensato inchiodate (fig.31).

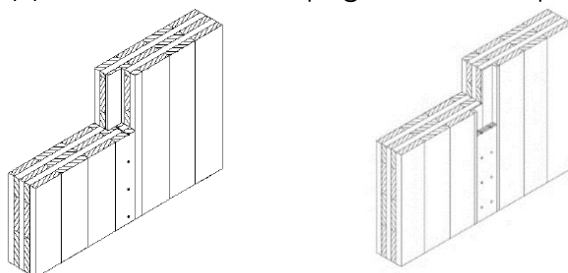


FIG.31 COLLEGAMENTO PARETE-PARETE X-LAM CON GIUNGO A MEZZO LEGNO E CON COPRIGIUNTO IN COMPENSATO (FONTE: ASSOLEGNO)

Il collegamento tra pareti ortogonali è indispensabile per garantire un maggiore comportamento scatolare all'intera costruzione. Tipicamente viene realizzato mediante viti che, nel caso di pannelli X-LAM, vanno inserite leggermente inclinate (almeno 30°) in modo da non essere avvitate solo in uno strato del pannello con direzione delle fibre parallela all'asse della vite, nel caso di pannelli intelaiati le viti possono essere disposte a 90° (Fig. 32).

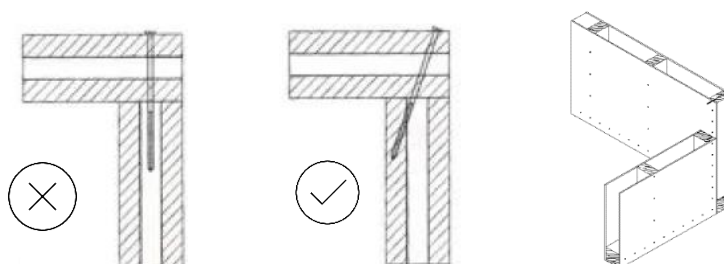


FIG.32 GIUNZIONE ORTOGONALE DI PANNELLI X-LAM E INTELAIATI (FONTE: ASSOLEGNO)

Partizione interna – partizione interna verticale – pareti interne verticali

Le pareti interne in X-LAM presentano la stessa stratigrafia da entrambi i lati del pannello portante, al quale segue un'orditura metallica o in altro materiale riempita con i pannelli isolanti e una finitura interna con lastra in cartongesso.

Chiusura – chiusura verticale – pareti perimetrali verticali

La parete in pannelli X-LAM, procedendo dall'interno verso l'esterno, è così formata: finitura interna con lastra in cartongesso, orditura metallica o in legno riempita con pannello isolante, pannello portante X-LAM, secondo strato di isolante, finitura per cappotto su rasante con rete porta-intonaco nel caso di parete intonacata, oppure sottostruttura in alluminio di supporto al rivestimento e rivestimento nel caso di parete ventilata.

Struttura portante – struttura di elevazione – orizzontale

Poiché presentano dimensioni trasversali ridotte per ragioni produttive e di trasporto, è necessario realizzare giunti tra pannello e pannello, in maniera simile rispetto al giunto tra pannelli verticali. Il collegamento può essere realizzato con giunto a mezzo legno avvitato, con viti incrociate o con tavole coprigiunto in compensato (fig. 33).

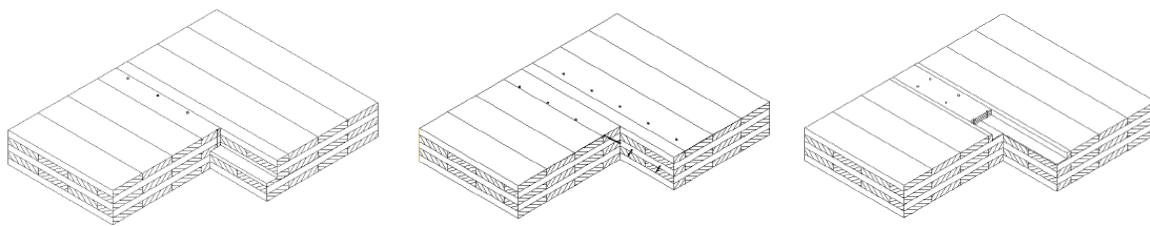


FIG. 33 COLLEGAMENTI PANNELLO-PANNELLO CON GIUNTO A MEZZO LEGNO AVVITATO, CON VITI INCROCIATE, CON TAVOLE COPRIGIUNTO (FONTE: ASSOLEGNO)

Partizione interna – partizione interna orizzontale – solai intermedi

In entrambi i sistemi costruttivi, X-LAM e telaio, il giunto pannello-solaio è realizzato sovrapponendo il pannello orizzontale a quello verticale. Per trasmettere le forze di trazione tra pannello superiore e pannello inferiore si utilizzano nastri forati passanti; per la trasmissione delle forze di taglio tra parete superiore e solaio si utilizzano angolare metallici, mentre per la trasmissione della forza di taglio tra solaio e parete inferiore si utilizzano viti (Fig. 34). In alternativa, il collegamento a taglio tra parete superiore e parete inferiore può essere realizzato mediante piastre forate (Fig. 35).

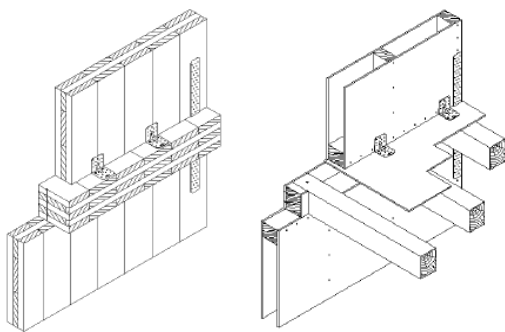


FIG.34 COLLEGAMENTO PARETE-SOLAIO TRAMITE ANGOLARI METALLICI, NASTRI FORATI E VITI, RISPETTIVAMENTE PER PANNELLI X-LAM E INTELAIATI (FONTE: ASSOLEGNO)

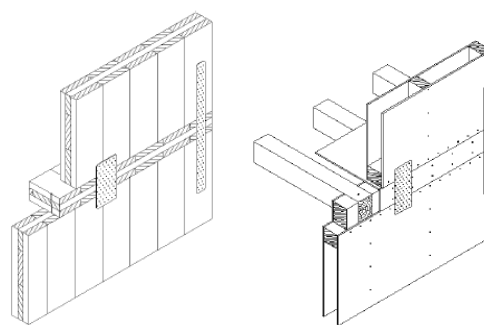


FIG. 35 COLLEGAMENTO PARETE-SOLAIO TRAMITE PIASTRE FORATE, NASTRI FORATI E VITI, RISPETTIVAMENTE PER PANNELLI X-LAM

La stratigrafia di un solaio intermedio X-LAM è composta da: pannello portante X-LAM, pannello isolante, telo per il contenimento del getto del massetto, massetto alleggerito per gli impianti e il pavimento. All'intradosso il solaio viene rifinito con una controsoffittatura in lastre di cartongesso, riempita con isolante.

Partizione interna – partizione interna inclinata – scale interne

Le scale interne di un edificio in legno possono essere realizzate in X-LAM in modi differenti. In un caso la rampa è realizzata mediante un pannello X-LAM inclinato e collegato tramite staffe metalliche sul pianerottolo, completata con ulteriori pannelli che creano i gradini, in un secondo caso il pannello inclinato può essere completato con alzate e pedate in legno massiccio o lamellare o ancora può essere messo in opera un pannello inclinato già sagomato. In alternativa, per realizzare una struttura più leggera, i pannelli in X-LAM che fungono da gradini possono essere collegati direttamente alla parete mediante angolari metallici avvitati.



FIG. 36 SCALA REALIZZATA CON PANNELLO INCLINATO X-LAM E PANNELLI ORIZZONTALI, CON PANNELLO X-LAM INCLINATO E ALZATE E PEDATE IN LEGNO MASSICCIO O LAMEL-

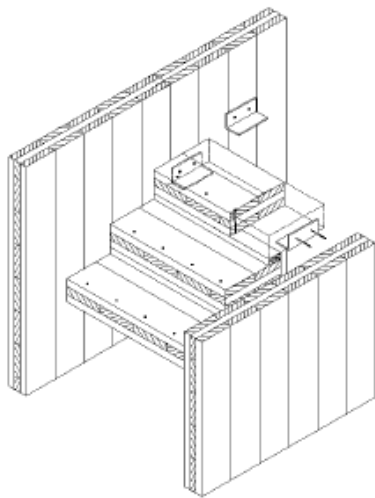


FIG. 37 SCALA REALIZZATA MEDIANTE PEDATE IN PANNELLI X-LAM COLLEGATI ALLE PARETI PERIMETRALI MEDIANTE ANGOLARI METALLICI AVVITATI

Partizione esterna – partizione esterna orizzontale – balconi

Anche per i balconi esistono molteplici soluzioni costruttive. Sia nel caso di edifici in X-LAM che di edifici intelaiati, lo sbalzo può essere realizzato prolungando gli elementi portanti del solaio, oppure con elementi che vengono collegati alla struttura portante.

Per balconi di edifici con solai X-LAM sono possibili tre opzioni: prolungamento del pannello del solaio, pannello in appoggio su staffe metalliche fissate alle pareti perimetrali e su pilastri esterni in legno o acciaio, travetti a sbalzo ancorati a taglio alle pareti mediante squadrette metalliche e ancorati a flessione al solaio mediante nastri forati chiodati (Fig. 38). Questo tipo di sbalzo viene completato con una guaina bituminosa e con uno strato isolante che copre tutti i lati del pannello per evitare i ponti termici, a seguire: il massetto delle pendenze, malta cementizia impermeabilizzante e il pavimento. All'intradosso la finitura è intonacata.

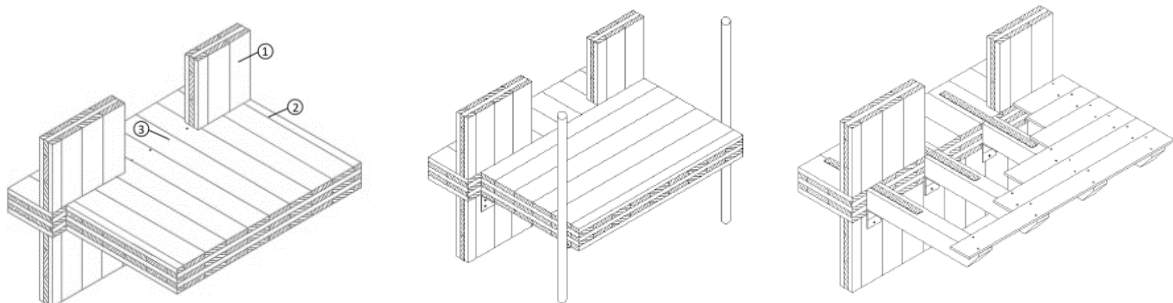


FIG. 38 BALCONE REALIZZATO CON PANNELLO X-LAM IN PROSECUZIONE DEL SOLAIO, PANNELLO X-LAM IN APPOGGIO SU STAFFE E PILASTRI, CON TRAVETTI A SBALZO (FONTE: ASSO-

APPLICAZIONE AI CASI STUDIO

DESCRIZIONE DEI CASI STUDIO

Per la verifica della metodologia sopra proposta sono state individuate due opere di architettura contemporanea con sistema costruttivo prevalentemente metallico e altre due opere con sistema costruttivo in legno. La scelta delle opere ha tenuto conto dei seguenti criteri:

- l'identificazione delle tecnologie costruttive più largamente utilizzate nel panorama del costruito attuale tra quelle esposte nel capitolo precedente;
- il valore riconosciuto nel panorama architettonico contemporaneo, attraverso la pubblicazione su riviste specializzate del settore;
- edifici di recente costruzione, nello specifico nell'ultimo decennio.

Il primo caso studio è il Centro di dermatologia "Avenida Central Building" (fig. 39) situato a Morelia, Messico, realizzato nel 2019 dallo studio di architettura Emilio Alvarez Abouchard Arquitectura. La struttura portante è caratterizzata da uno scheletro in carpenteria metallica, orizzontamenti in lamiera grecata con getto collaborante ed involucro stratificato "a secco".

Il secondo caso studio è l'edificio scolastico "Melopee" (fig. 40) situato a Gent, Belgio, realizzato nel 2020 dallo studio di architettura XDGA. L'edificio è composto da un corpo "A", la cui struttura portante è caratterizzata da uno scheletro in carpenteria metallica ed orizzontamenti in pannelli prefabbricati in calcestruzzo, e da un corpo "B", la cui struttura portante è caratterizzata da una struttura in cemento armato ed involucro stratificato "a secco".

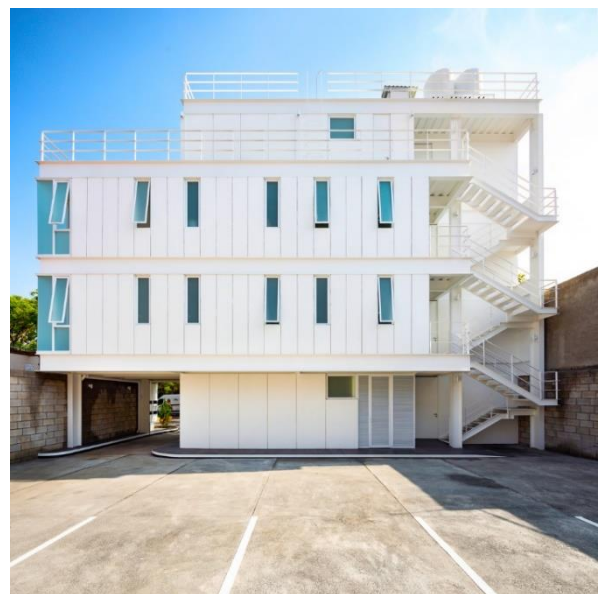


FIG. 39 FOTO DEL PRIMO CASO STUDIO AVENIDA CENTRAL BUILDING

I casi studio in legno sono entrambi situati in Italia. Il primo è "Villa GP" (Fig. 41), una villa unifamiliare situata a Valdagno (VI), realizzata nel 2018 da IRODA Studio in collaborazione con Bahaus – legno in stile italiano. La struttura portante dell'edificio è un telaio in legno. Il secondo caso studio è "Cenni di cambiamento" (Fig. 42), un complesso di edilizia sociale realizzato in Via Cenni, a Milano, dallo studio RPA Rossi Prodi Associati s.r.l. ultimato nel 2013. L'intervento, caratterizzato da una struttura portante in X-LAM, è stato a lungo il più grande complesso in X-LAM realizzato in Europa.

Per la facilità di calcolo, essendo il complesso costituito da quattro edifici a torre e da alcuni corpi bassi con prevalente sviluppo orizzontale, si è scelto di applicare la metodologia ad uno solo dei quattro edifici.



FIG. 40 SECONDO CASO STUDIO MELOPEE SCHOOL



FIG. 41 TERZO CASO STUDIO VILLA GP

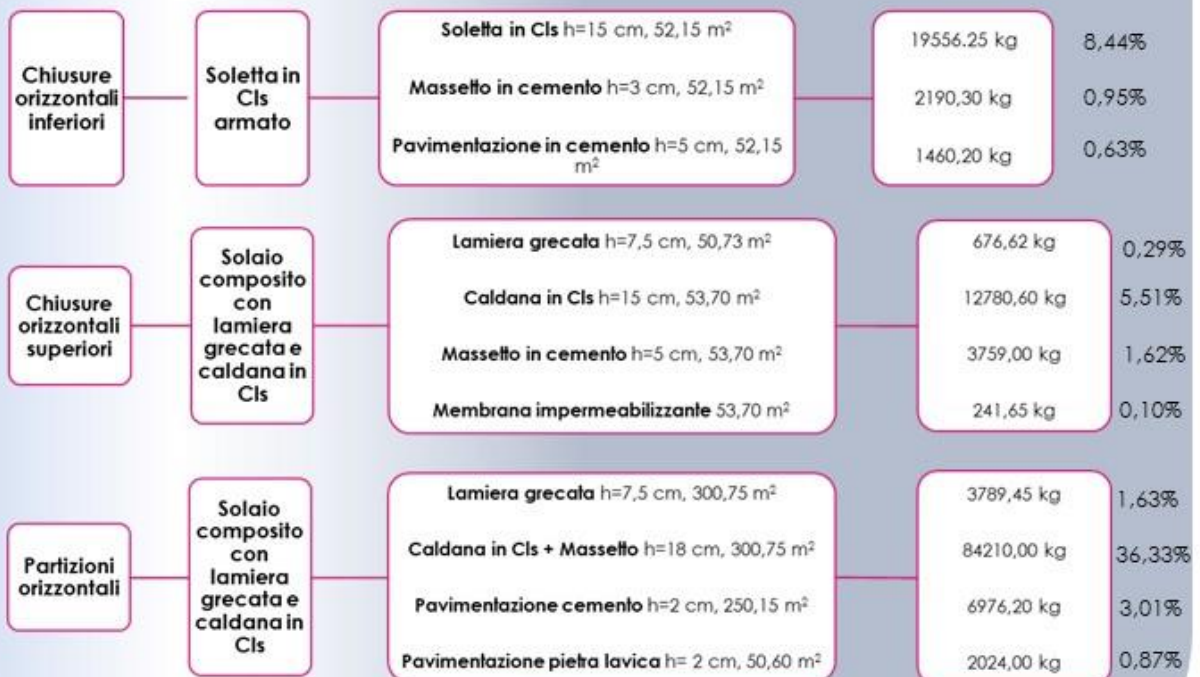


FIG. 42 QUARTO CASO STUDIO COMPLESSO CENNI

1° fase Verifica pre – demolizione ai sensi dell'*art. 2.4.14 Disassemblaggio*

Una verifica pre – demolizione è una fase estremamente utile in quanto, attraverso la stesura di un inventario dei materiali e degli elementi costruttivi dell'organismo edilizio, avremo una precisa organizzazione degli organismi edilizi da demolire al fine di attuare una corretta decostruzione con le relative pratiche di smontaggio. Di seguito sono illustrate le schede di pre-audit dei quattro casi studio con l'indicazione del relativo peso degli elementi tecnici, espresso in percentuale, rispetto al peso totale dei materiali utilizzati per l'edificio.

Verifica pre-demolizione 1° CASO STUDIO (acciaio) – AVENIDA CENTRAL BUILDING



Verifica pre-demolizione
1° CASO STUDIO (acciaio) – AVENIDA CENTRAL BUILDING

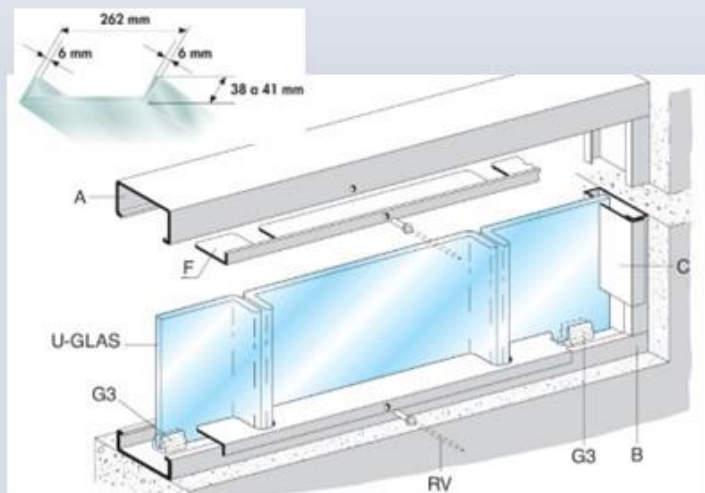


| | | | | |
|-------------------------------------|--|--|-------------|-------|
| Partizioni esterne verticali | Gabbia ascensore - Pilastri in acciaio | 4 tubi a sezione quadrata, 150 mm | 953,68 kg | 0,41% |
| | Gabbia ascensore - Travi in acciaio | 32 tubi a sezione quadrata, 150 mm | 1192,13 kg | 0,51% |
| | Gabbia ascensore - Parete in vetromattoni | Vetromattoni, 36,56 m ² | 14622,00 kg | 6,31% |
| Partizioni esterne inclinate | Scala esterna - Travi in acciaio | 8 travi sagomate a ginocchio IPE 200 8 travi orizzontali IPE 200 | 853,44 kg | 0,37% |
| | Scala esterna - Gradini e pianerottoli in acciaio | 42 gradini in acciaio 0,70x0,30 6 pianerottoli in acciaio 0,80x0,80 | 318,00 kg | 0,14% |



Verifica pre-demolizione
1° CASO STUDIO (acciaio) – AVENIDA CENTRAL BUILDING

| | | | | |
|---------------------------|--|---|-------------|-------|
| Chiusure verticali | Sistema curtain wall - Pannelli in vetro "U-glass" | 80 pannelli "U - glass", 2,50x0,26 12 pannelli "U - glass", 1,00x0,26 4 pannelli "U - glass", 1,00x0,40 2 pannelli "U - glass", 2,50x1,10 2 pannelli "U - glass", 2,50x0,70 | 1314,40 kg | 0,57% |
| | Sistema curtain wall - Intelaiatura metallica | Profili in alluminio sagomati a freddo, 0,06 m ³ | 167,70 kg | 0,07% |
| | Pareti pesanti "a umido" - Laterizi | Laterizi "Tabimax12", 21,95 m ³ | 17560,00 kg | 7,58% |
| | Pareti pesanti "a umido" - Intonaco | Intonaco, 376,55 m ² | 11296,00 kg | 4,87% |

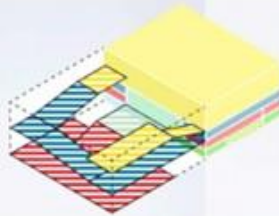


| | | | | |
|---|--------------------------------------|---|------------|-------|
| Partizioni interne verticali ed infissi interni ed esterni verticali | Pareti leggere "a secco" | Lastre in vetro "U - glass", 38,25 m ² Telaio in alluminio, 0,25 m ³ | 1440,40 kg | 0,62% |
| | Pareti pesanti "a umido" | Laterizi Tabimax12, 16,28 m ³ Intonaco, 268,58 m ² | 167,70 kg | 0,07% |
| | Infissi interni ed esterni verticali | Portefinestre, lastre in vetro, 65,00 m ² Portefinestre, telaio, 0,46 m ³ Finestre ad anta fissa, lastre in vetro, 7,14 m ² Finestre ad anta fissa, telaio, 0,07 m ³ Finestre a visiera, lastre in vetro, 19,26 m ² Finestre a visiera, telaio, 0,29 m ³ | 3482,28 kg | 1,50% |

Verifica pre-demolizione
2° CASO STUDIO (acciaio) – MELOPEE SCHOOL

Per l'edificio scolastico "Melopee" sono stati redatti due inventari, uno per il corpo A, la cui struttura portante è caratterizzata da uno scheletro in carpenteria metallica, ed uno per il corpo B (figura), la cui struttura portante è caratterizzata da una struttura in cemento armato.

Corpo "A"



Corpo "B"



CORPO A



Verifica pre-demolizione
2° CASO STUDIO (acciaio) – MELOPEE SCHOOL

CORPO A

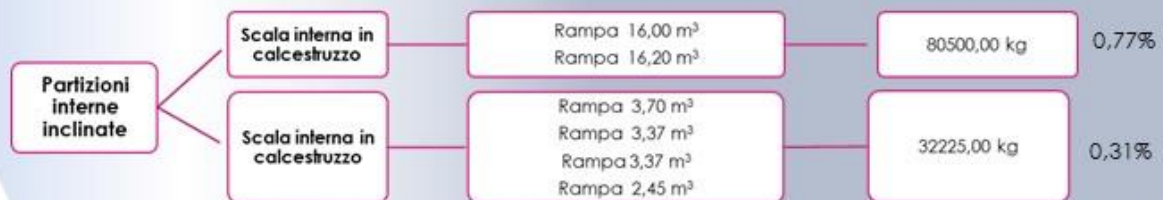
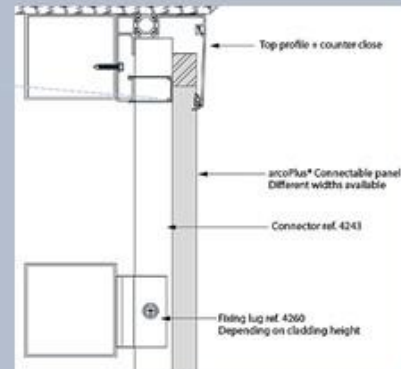
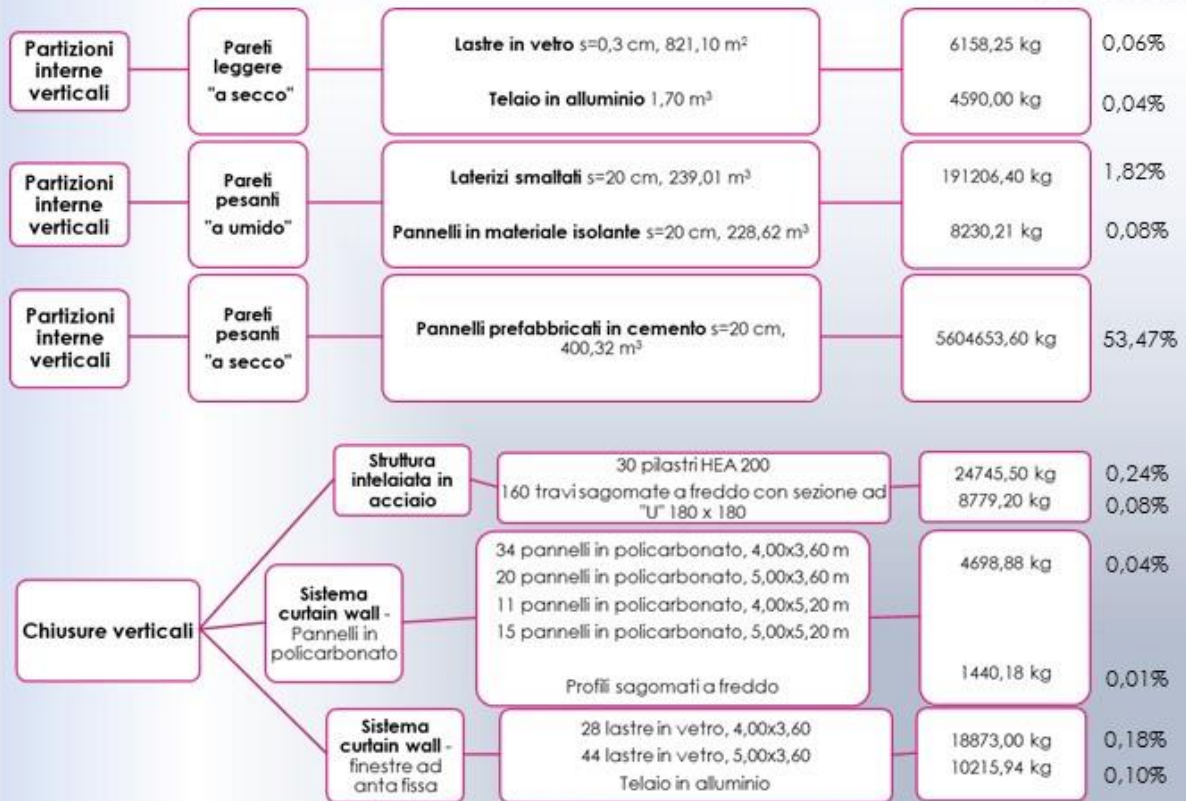
% PESO ELEMENTO/
PESO TOT EDIFICIO



Verifica pre-demolizione
2° CASO STUDIO (acciaio) – MELOPEE SCHOOL

CORPO B

% PESO ELEMENTO/
PESO TOT EDIFICIO

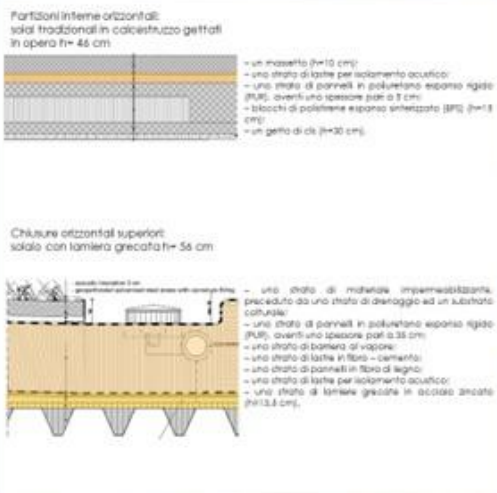


Verifica pre-demolizione 2° CASO STUDIO (acciaio) – MELOPEE SCHOOL

CORPO B

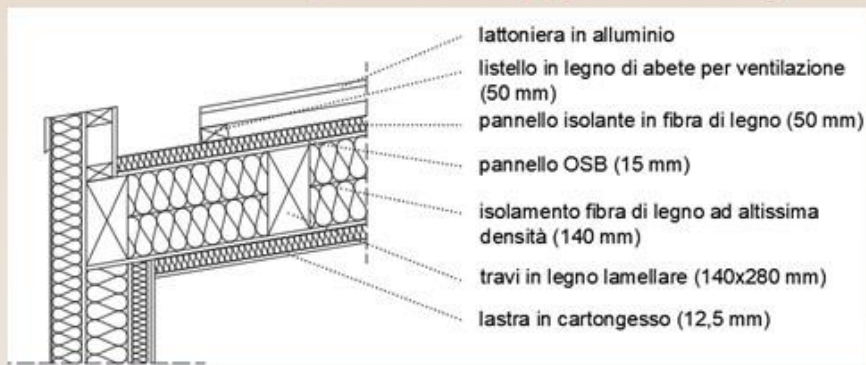
% PESO ELEMENTO/
PESO TOT EDIFICIO

| Chiusure orizzontali inferiori | Solaio tradizionale con getto in C/S | Massetto in cemento h=10 cm, 1300 m ² | 182000,00 kg | 1,74% |
|---------------------------------------|---|---|---------------|--------|
| | | Lastre per isolamento acustico h=0,5 cm, 1300 m ² | 1625,00 kg | 0,02% |
| | | Pannelli di materiale isolante h=12 cm, 1300 m ² | 5616,00 kg | 0,05% |
| | | Getto di C/S h=25 cm, 1300 m ² | 812500,00 kg | 7,75% |
| Partizioni interne orizzontali | Solai tradizionali con getto in C/S | Massetto in cemento h=10 cm, 3807 m ² | 569380,00 kg | 5,43% |
| | | Lastre per isolamento acustico 3807 m ² | 4372,50 kg | 0,04% |
| | | Pannelli di materiale isolante h=5 cm, 3807 m ² | 7336,40 kg | 0,07% |
| | | Blocchi di polistirolo espanso h=15 cm, 2500 m ² | 11702,50 kg | 0,11% |
| | | Getto di C/S h=30cm, 3807 m ² | 1985156,00 kg | 18,94% |
| Chiusure orizzontali superiori | Solaio con lamiera grecata | Membrana impermeabiliz. 1300 m ² | 5850,00 kg | 0,06% |
| | | Pannelli di materiale isolante h=35 cm, 1300 m ² | 16380,00 kg | 0,16% |
| | | Barriera al vapore 1300 m ² | 143,00 kg | 0,00% |
| | | Pannelli in fibra di legno h=3 cm, 1300 m ² | 6240,00 kg | 0,06% |
| | | Lastre per isolamento acustico h=1 cm, 1300 m ² | 1625,00 kg | 0,02% |
| | | Lamiere grecate h=13,5 cm, 1300 m ² | 2024,00 kg | 0,02% |



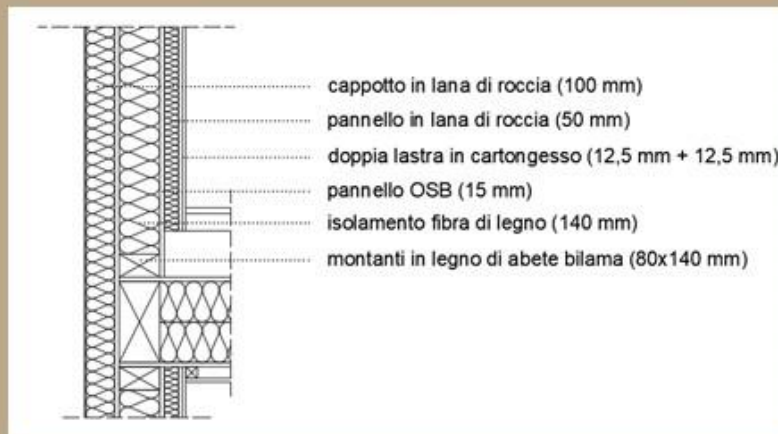
Verifica pre-demolizione 3° CASO STUDIO (legno) – VILLA GP

| | | % PESO ELEMENTO / PESO TOT EDIFICIO |
|------------------------------|------------------------------|--|
| Copertura, abitazione | Travi in legno lamellare | 23 elementi 2917,66 kg 8,36% |
| | Pannelli OSB | 60 elementi 1517,4 kg 4,35% |
| | Isolamento in fibra di legno | 216 elementi 1916,01 kg 5,49% |
| Copertura, garage | Travi in legno lamellare | 13 elementi 1437,66 kg 4,12% |
| | Pannelli OSB | 30 elementi 601,56 kg 1,72% |
| | Isolamento in fibra di legno | 100 elementi 820,51 kg 2,35% |

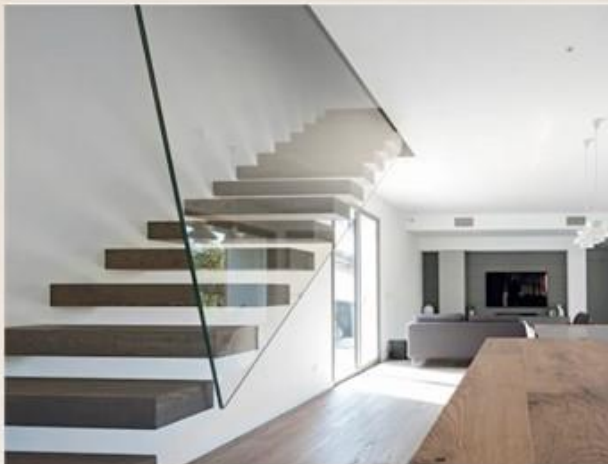
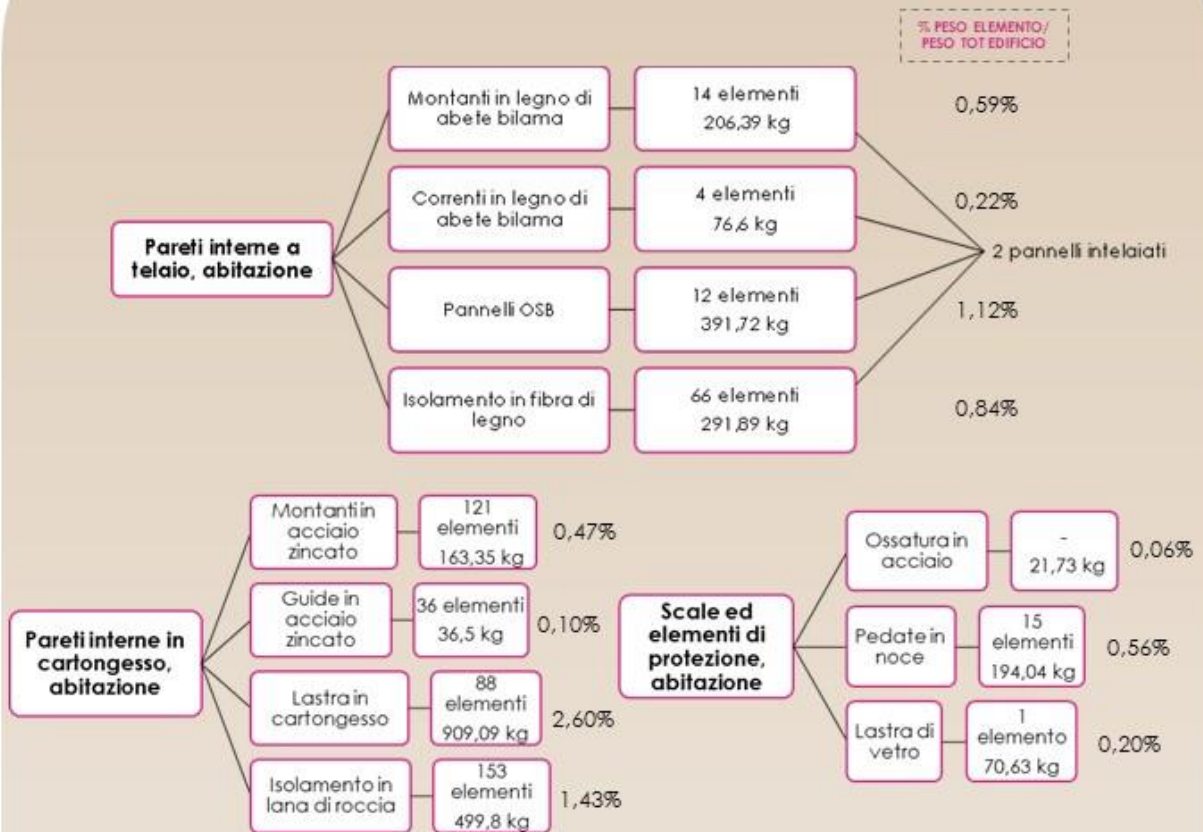


Verifica pre-demolizione 3° CASO STUDIO (legno) – VILLA GP

% PESO ELEMENTO /
PESO TOT EDIFICIO

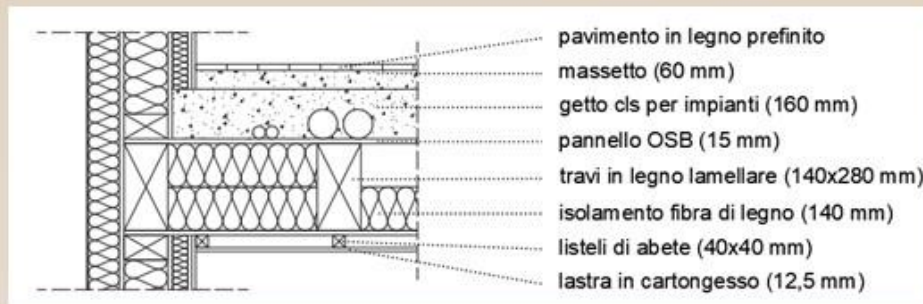


Verifica pre-demolizione 3° CASO STUDIO (legno) – VILLA GP



Verifica pre-demolizione 3° CASO STUDIO (legno) – VILLA GP

| | | % PESO ELEMENTO/ PESO TOT EDIFICIO | |
|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------|
| Solaio interpiano, abitazione | Travi in legno lamellare | 31 elementi 3567,82 kg | 10,22% |
| | Pannelli OSB | 64 elementi 1590,30 kg | 4,55% |
| | Isolamento in fibra di legno | 232 elementi 2057,93 kg | 5,89% |



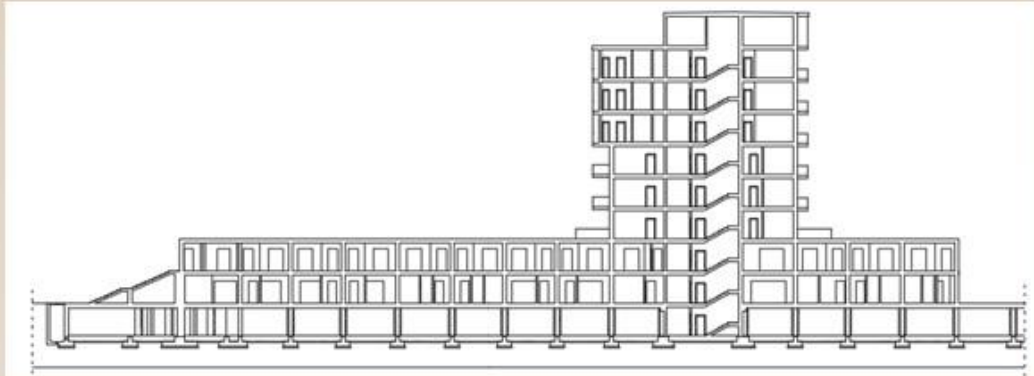
| | | | |
|--|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Balconi ed elementi di protezione, abitazione | Montanti in legno di abete bilama | 18 elementi 72,58 kg | 0,21% |
| | Correnti in legno di abete bilama | 6 elementi 90,72 kg | 0,26% |
| | Pannelli OSB | 16 elementi 142,85 kg | 0,41% |
| | Isolamento in fibra di legno | 30 elementi 99,79 kg | 0,29% |
| | Lastra di vetro | 3 elementi 50,63 kg | 0,15% |
| | | | 3 pannelli intelaiati |



Verifica pre-demolizione
4° CASO STUDIO (legno) – COMPLESSO CENNI

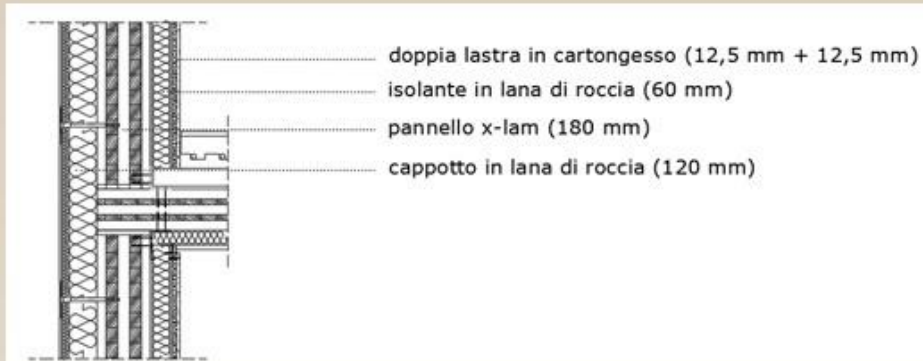
**% PESO ELEMENTO/
 PESO TOT EDIFICIO**

| Struttura di elevazione | Elemento | Quantità | Peso | % PESO ELEMENTO/ PESO TOT EDIFICIO |
|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------------------------------|
| Struttura di elevazione | Pilastrini cemento armato | 111 elementi | 174825 kg | 8,86% |
| | Travi in cemento armato | 183 elementi | 650411,60 kg | 32,96% |



| Pareti perimetrali | Elemento | Quantità | Peso | % PESO ELEMENTO/ PESO TOT EDIFICIO |
|--------------------|-----------------------|-------------|--------------|---------------------------------------|
| Pareti perimetrali | Pannelli X-LAM 200 mm | 13 elementi | 52308,87 kg | 2,65% |
| | Pannelli X-LAM 180 mm | 37 elementi | 107210,09 kg | 5,43% |
| | Pannelli X-LAM 160 mm | 17 elementi | 31921,71 kg | 1,62% |
| | Pannelli X-LAM 140 mm | 18 elementi | 27931,70 kg | 1,42% |
| | Pannelli X-LAM 120 mm | 8 elementi | 11970,64 kg | 0,61% |

Verifica pre-demolizione
4° CASO STUDIO (legno) – COMPLESSO CENNI

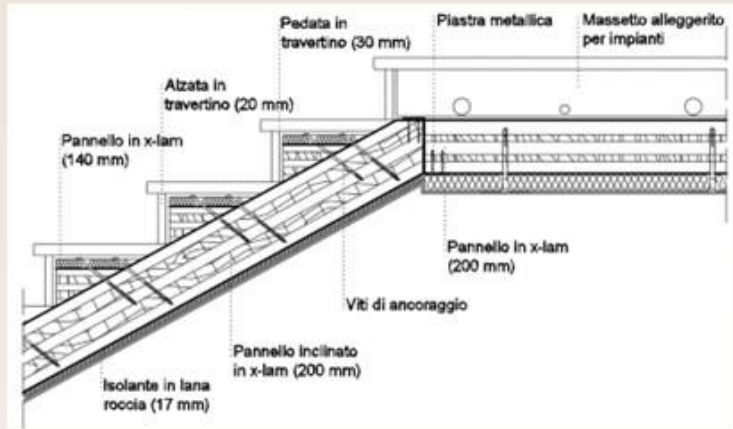


| | | % PESO ELEMENTO/ PESO TOT EDIFICIO | |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------|
| Copertura | Pannelli X-LAM 200 mm | 8 elementi 19905,20 kg | 1,01% |
| | Pannelli X-LAM 200 mm | 31 elementi 31320,08 kg | 1,59% |
| Pareti interne in x-lam | Pannelli X-LAM 180 mm | 45 elementi 61232,11 kg | 3,10% |
| | Pannelli X-LAM 160 mm | 19 elementi 27192,66 kg | 1,38% |
| | Pannelli X-LAM 140 mm | 16 elementi 19531,50 kg | 0,99% |
| | Pannelli X-LAM 120 mm | 5 elementi 2715,60 kg | 0,14% |

Verifica pre-demolizione
4° CASO STUDIO (legno) – COMPLESSO CENNI



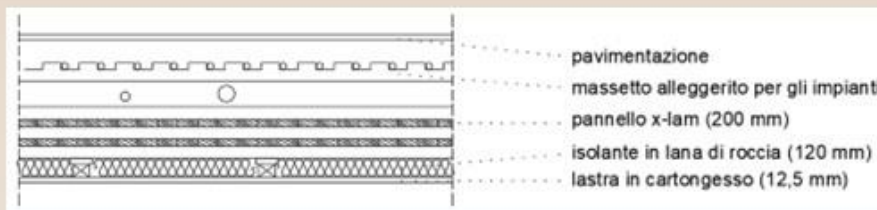
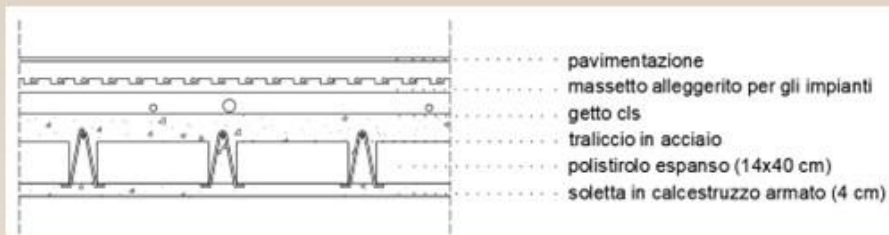
| | | % PESO ELEMENTO/ PESO TOT EDIFICIO | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| Pareti interne in cartongesso | Montanti in acciaio zincato | 2000 elementi 3000 kg | 0,15% |
| | Guide in acciaio zincato | 570 elementi 659 kg | 0,03% |
| | Lastra in cartongesso | 683 elementi 22375,08 kg | 1,13% |
| | Isolamento in lana di roccia | 2355 elementi 9891 kg | 0,50% |
| Scale interne | Pannelli X-LAM 200 mm, rampa | 24 elementi 3857,29 kg | 0,20% |
| | Pannelli X-LAM 200 mm, pianerottolo | 16 elementi 1794,09 kg | 0,09% |
| | Pannelli X-LAM 140 mm, gradini | 136 elementi 3415,94 kg | 0,17% |



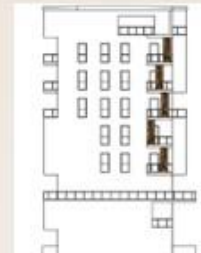
Verifica pre-demolizione 4° CASO STUDIO (legno) – COMPLESSO CENNI

% PESO ELEMENTO/
PESO TOT EDIFICIO

| | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------|
| Solaio in calcestruzzo armato | Lastre predalle | 285 elementi 148866 kg | 7,54% |
| | Getto in calcestruzzo | 68,07 m ³ 163377,60 kg | 8,28% |
| Solaio in X-LAM | Pannelli X-LAM | 172 elementi 330875,64 kg | 16,77% |



| | | | |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------|
| Balconi in X-LAM | Pannelli X-LAM | 72 elementi 53708,26 kg | 2,72% |
| Elementi di protezione | Lastre di vetro | 245 elementi 2528,44 kg | 0,13% |
| | Tubolari in acciaio | 552 elementi 1521,17 kg | 0,08% |
| | Frangisole in alluminio | 69 elementi 754,52 kg | 0,04% |



Verifica pre-demolizione
4° CASO STUDIO (legno) – COMPLESSO CENNI

% PESO ELEMENTO/
PESO TOT EDIFICIO

| Infissi interni ed esterni | | | |
|----------------------------|----------------------------|--|-------|
| Porta in tamburato 80x210 | 220 elementi 2446,08 kg | | 0,12% |
| Telaio in rovere 80x210 | 151 elementi 1434,50 kg | | 0,07% |
| Lastra di vetro 60x60 | 116 elementi 522 kg | | 0,03% |
| Lastra di vetro 50x220 | 60 elementi 825 kg | | 0,04% |
| Lastra di vetro 70x220 | 99 elementi 1905,75 kg | | 0,10% |
| Telaio alluminio 60x60 | 58 elementi 240,82 kg | | 0,01% |
| Telaio alluminio 50x220 | 45 elementi 192,03 kg | | 0,01% |
| Telaio alluminio 70x220 | 21 elementi 86,67 kg | | 0,00% |
| Telaio alluminio 140x220 | 79 elementi 485,27 kg | | 0,02% |

1° fase Risorse materiche in input ed in output – presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita

Avenida Central Building – 1° caso studio acciaio

| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE | kg |
|---|---------------|
| Acciaio struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) – materiali strutturali | 20810 |
| Acciaio scala esterna (travi, travi a ginocchio) – materiali strutturali | 460 |
| Acciaio scala esterna (gradini, pianerottoli) – materiali non strutturali | 250 |
| Acciaio gabbia ascensore – materiali strutturali | 1230 |
| Vetro pannelli U-Glass chiusure verticali - materiali non strutturali | 420 |
| Alluminio intelaiatura metallica pannelli U-Glass - materiali non strutturali | 120 |
| Vetro infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 1390 |
| Alluminio infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 1970 |
| Pietra lavica pavimentazione esterna - materiali non strutturali | 1010 |
| TOTALE | 27660 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (SFRIDO) | kg |
| Acciaio struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) – materiali strutturali | 19930 |
| Acciaio scala esterna (travi, travi a ginocchio) – materiali strutturali | 540 |
| Acciaio scala esterna (gradini, pianerottoli) – materiali non strutturali | 70 |
| Acciaio gabbia ascensore – materiali strutturali | 910 |
| Vetro pannelli U-Glass chiusure verticali - materiali non strutturali | 890 |
| Alluminio intelaiatura metallica pannelli U-Glass - materiali non strutturali | 50 |
| Vetro infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 650 |
| Alluminio infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 920 |
| Pietra lavica pavimentazione esterna - materiali non strutturali | 1010 |
| TOTALE | 24980 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE | kg |
| Laterizi forati (partizioni interne verticali) – materiali non strutturali | 10420 |
| Laterizi forati (chiusure verticali) – materiali non strutturali | 14050 |
| Cemento (chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni interne orizzontali) – ms | 27020 |
| Calcestruzzo (chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni interne orizzontali) – ms | 103920 |
| Lamiere grecate (chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni interne orizzontali) – ms | 447 |
| TOTALE | 159860 |
| QUANTITA' MATERIALE DA SMALTIRE | kg |
| Membrane impermeabilizzanti chiusure orizzontali sup. | 240 |
| Vetrocemento gabbia ascensore e chiusure verticali | 15850 |
| TOTALE | 16090 |

TAB. 5 BILANCIO MATERICO AVENIDA CENTRAL BUILDING

Melopee School – 2° caso studio acciaio

| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE | kg |
|---|---------------|
| Acciaio struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) – materiali strutturali | 192250 |
| Acciaio scala esterna (travi, travi a ginocchio) – materiali strutturali | 399 |
| Acciaio scala esterna (gradini, pianerottoli) – materiali non strutturali | 172 |
| Polycarbonato pannelli chiusure verticali – mns | 376 |
| Alluminio intelaiatura metallica pannelli in polycarbonato - mns | 101 |
| Vetro infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 14930 |
| Alluminio infissi verticali e pareti leggere a secco - materiali non strutturali | 918 |
| Vetro pavimentazione esterna – mns | 554 |
| Pannelli in fibrocemento chiusure superiori – mns | 702 |
| Pannelli in fibra di legno chiusure superiori – mns | 287 |
| Pannelli isolamento acustico EPS chiusure superiori – mns | 55 |
| Acciaio lamiere grecate chiusure superiori - ms | 928 |
| TOTALE | 252100 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (SFRIDO) | kg |

| | |
|---|----------------|
| Acciaio struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) – materiali strutturali | 59390 |
| Acciaio scala esterna (travi, travi a ginocchio) – materiali strutturali | 140 |
| Acciaio scala esterna (gradini, pianerottoli) – materiali non strutturali | 50 |
| Policarbonato pannelli chiusure verticali – mns | 94 |
| Alluminio intelaiatura metallica pannelli in policarbonato - mns | 43 |
| Vetro infissi verticali e pareti leggere a secco - mns | 915 |
| Alluminio infissi verticali e pareti leggere a secco - mns | 563 |
| Vetro pavimentazione esterna – mns | 706 |
| Pannelli in fibrocemento chiusure superiori – mns | 10530 |
| Pannelli in fibra di legno chiusure superiori – mns | 337 |
| Pannelli isolamento acustico EPS chiusure superiori – mns | 43 |
| Acciaio lamiere grecate chiusure superiori - ms | 619 |
| TOTALE | 105020 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE | kg |
| Laterizi forati (partizioni interne verticali) – materiali non strutturali | 152970 |
| Cemento (chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni interne orizzontali) – ms | 751380 |
| Cemento partizioni interne verticali - mns | 560450 |
| Calcestruzzo (chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni interne orizzontali) – ms | 3632860 |
| TOTALE | 5097660 |
| QUANTITA' MATERIALE DA SMALTIRE | kg |
| Membrane impermeabilizzanti chiusure orizzontali sup. | 585 |
| Pannelli materiali isolante in PUR chiusure orizzontali superiori | 16380 |
| Pannelli materiali isolante in PUR chiusure orizzontali inferiori e partizioni interne orizz. | 12950 |
| Pannelli materiali isolante in PUR partizioni interne verticali | 880 |
| Pannelli di materiale isolante lana di roccia partizioni interne orizzontali | 338 |
| Blocchi EPS chiusure orizzontali inf., sup. e partizioni orizzontali | 11700 |
| TOTALE | 59060 |

TAB. 6 BILANCIO MATERICO MELOPEE SCHOOL

Villa GP – 3° caso studio legno

| | |
|---|--------------|
| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE (AL NETTO DELLO SFRIDO) | kg |
| Montanti in abete | 2904 |
| Correnti in abete | 2036 |
| Travi lamellari | 7131 |
| Pannello isolante in fibra di legno | 4704 |
| Pannello in lana di roccia | 500 |
| Infissi | 742 |
| Lastre di vetro | 109 |
| TOTALE | 18125 |
| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE (SFRIDO) | kg |
| Montanti in abete | 323 |
| Correnti in abete | 226 |
| Travi lamellari | 792 |
| Pannello isolante in fibra di legno | 0 |
| Pannello in lana di roccia | 0 |
| Infissi | 13 |
| Lastre di vetro | 12 |
| TOTALE | 1367 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (AL NETTO DELLO SFRIDO) | kg |
| Pannelli OSB | 8729 |
| Montanti in acciaio | 147 |
| Guide in acciaio | 33 |
| Lastre in cartongesso | 818 |
| TOTALE | 9727 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (SFRIDO) | kg |

| | |
|--|-------------|
| Pannelli OSB | 970 |
| Montanti in acciaio | 16 |
| Guide in acciaio | 4 |
| Lastre in cartongesso | 91 |
| TOTALE | 1081 |
| QUANTITA' MATERIALE DA SMALTIRE | kg |
| TOTALE | 0 |

TAB. 7 BILANCIO MATERICO VILLA GP

Complesso Cenni – 4° caso studio legno

| | |
|---|---------------|
| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE (AL NETTO DELLO SFRIDO) | kg |
| Pannelli X-LAM | 746254 |
| Pannello in lana di roccia | 9891 |
| Infissi | 9613 |
| Lastre vetro parapetti | 2194 |
| Frangisole alluminio | 754 |
| TOTALE | 768708 |
| QUANTITA' MATERIALE RIUTILIZZABILE (SFRIDO) | kg |
| Pannelli X-LAM | 79070 |
| Pannello in lana di roccia | 0 |
| Infissi | 575 |
| Lastre vetro parapetti | 244 |
| Frangisole alluminio | 0 |
| TOTALE | 79889 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (AL NETTO DELLO SFRIDO) | kg |
| Montanti in acciaio | 2700 |
| Guide in acciaio | 593 |
| Tubolari in acciaio | 1341 |
| Lastre in cartongesso | 20138 |
| TOTALE | 24772 |
| QUANTITA' MATERIALE RICICLABILE (SFRIDO) | Kg |
| Montanti in acciaio | 300 |
| Guide in acciaio | 66 |
| Tubolari in acciaio | 149 |
| Lastre in cartongesso | 2237 |
| Calcestruzzo | 120188 |
| Barre di armatura | 41419 |
| TOTALE | 164359 |
| QUANTITA' MATERIALE DA SMALTIRE | kg |
| calcestruzzo | |
| TOTALE | 341244 |

TAB. 8 BILANCIO MATERICO COMPLESSO CENNI

2° fase

2° fase LIVELLO DI DISASSEMBLABILITA'

1° CASO STUDIO (acciaio) – AVENIDA CENTRAL BUILDING

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO SPERIMENTALE INTEGRATO materiali prevalenti | MSI Unità tecnologica |
|--|---|---|--|--|--------------------------|
| STRUTTURE DI ELEVAZIONE | VERTICALI E ORIZZONTALI | PILASTRI IN ACCIAIO | Bullonature 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con autogrù L>12m 40% -Rimozione di parti saldate 40% | 0,76 | 0,51 |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Saldature 40% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di parti saldate 40% | 0,44 | |
| PARTIZIONI ESTERNE INCLINATE | SCALE ESTERNE | GRADINI E PIANEROTTOLI IN ACCIAIO | Bullonature difficilmente accessibili 80% - Trasporto manuale 100% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,84 | 0,54 |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Saldature 40% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di parti saldate 40% | 0,44 | |
| PARTIZIONI ESTERNE VERTICALI | GABBIA ASCENSORE | PARETI IN VETROMATTONE | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,07 |
| | | TUBI SCATOLARI IN ACCIAIO-PILASTRI TUBI SCATOLARI IN ACCIAIO-TRAVI | Bullonature 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con autogrù L>12m 40% - Rimozione di parti saldate 40% Saldature 40% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di parti saldate 40% | 0,76 0,44 | |
| CHIUSURE ORIZZONTALI INFERIORI | SOLAI A TERRA – SOLAIO CON SOLETTA IN CLS | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | SOLETTA IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI (livello 1 e 2) | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECATA E CALDANA IN CLS | PAVIMENTAZIONE IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | | | |
| | | LAMIERE GRECATE | | | |
| | | CALDANA IN CLS | | | |

| | | | | | |
|--|--|---|--|------|------|
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI (livello 3) | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECCATA E CALDANA IN CLS | PAVIMENTAZIONE IN PIETRA LAVICA | Adesivi 20% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,44 | 0,03 |
| | | PAVIMENTAZIONE IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | | LAMIERE GRECCATE | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | | CALDANA IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| CHIUSURE SUPERIORI | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECCATA E CALDANA IN CLS | MEMBRANA IMPERMEABILIZZANTE | Materiale pericoloso (discarica/valorizzatore) | 0,00 | 0,00 |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | | LAMIERE GRECCATE | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | | CALDANA IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI LEGGERE 'A SECCO' | MODULI IN VETRO E ALLUMINIO | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,68 | 0,68 |
| | | INTELLAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature 80% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 0,72 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | INTONACO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| CHIUSURE VERTICALI | SISTEMA 'CURTAIN WALL' | PANNELLI IN VETRO 'U-GLASS' | Adesivi 20% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,32 | 0,36 |
| | | INTELLAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature 80% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 0,72 | |
| | | INTONACO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | PORTEFINESTRE IN VETRO-ALLUMINIO | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,68 | |
| | | VETRATE | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,68 | |
| INFISSI ESTERNI VERTICALI | FINESTRE A VISIONE | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,68 | 0,68 | |

TAB. 9 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ MSI METODO SPERIMENTALE INTEGRATO DEL PRIMO CASO STUDIO

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI | METODO UNI materiali prevalenti | METODO UNI unità tecnologica |
|--|---|------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------|
| STRUTTURE DI ELEVAZIONE | VERTICALI E ORIZZONTALI | PILASTRI IN ACCIAIO | Bullonature | 3 (0,60) | 0,6 (0,12) |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Saldature | 0 | |
| PARTIZIONI ESTERNE INCLINATE | SCALE ESTERNE | GRADINI E PIANEROTTOLI IN ACCIAIO | Bullonature | 3 | 0,7 (0,14) |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Saldature | 0 | |
| PARTIZIONI ESTERNE VERTICALI | GABBIA ASCENSORE | PARETI IN VETROMATTONE | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0,2 (0,03) |
| | | TUBI SCATOLARI IN ACCIAIO-PILASTRI | Bullonature | 3 | |
| | | TUBI SCATOLARI IN ACCIAIO-TRAVI | Saldature | 0 | |
| CHIUSURE ORIZZONTALI INFERIORI | SOLAI A TERRA – SOLAIO CON SOLETTA IN CLS | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | SOLETTA IN CLS | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI (livello 1 e 2) | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECATA E CALDANA IN CLS | PAVIMENTAZIONE IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | | | |
| | | LAMIERE GRECATE | | | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI (livello 3) | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECATA E CALDANA IN CLS | PAVIMENTAZIONE IN PIETRA LAVICA | Adesivi | 0 | 0 |
| | | PAVIMENTAZIONE IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| | | LAMIERE GRECATE | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| CHIUSURE SUPERIORI | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON LAMIERA GRECATA E CALDANA IN CLS | MEMBRANA IMPERMEABILIZZANTE | Materiale pericoloso (discarica/valorizzatore) | 0 | 0 |
| | | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| | | LAMIERE GRECATE | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| | | CALDANA IN CLS | Leganti idraulici e aerei | 0 | |

| | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|---|-------------|
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI LEGGERE 'A SECCO' | MODULI IN VETRO E ALLUMINIO | Avvitature | 3 | 3 (0,60) |
| | | INTELAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature | 3 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | INTONACO | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| CHIUSURE VERTICALI | SISTEMA 'CURTAIN WALL' | PANNELLI IN VETRO 'U-GLASS' | Adesivi | 0 | 0,07 (0,07) |
| | | INTELAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature | 3 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | INTONACO | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei | 0 | |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | PORTEFINESTRE IN VETRO-ALLUMINIO | Avvitature | 3 | 3 (0,60) |
| | | VETRATE | Avvitature | 3 | |
| | | FINESTRE A VISIERA | Avvitature | 3 | |
| | | | | | |

TAB. 10 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ METODO UNI DEL PRIMO CASO STUDIO

2° CASO STUDIO (acciaio) – MELOPEE SCHOOL

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO SPERIMENTALE INTEGRATO materiali prevalenti | MSI Unità tecnologica | |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|--|--|--------------------------|------|
| STRUTTURE DI ELEVAZIONE | VERTICALI E ORIZZONTALI | PILASTRI IN ACCIAIO | Bullonature 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con autogrù L>12m 40% - Taglio di parti forate 60% | 1,20 | 0,76 | |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Bullonature 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 1,32 | | |
| PARTIZIONI ESTERNE INCLINATE | SCALE ESTERNE | GRADINI E PIANEROTTOLI IN ACCIAIO | Bullonature difficilmente accessibili 80% - Trasporto manuale 100% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,84 | 0,75 | |
| | | TRAVI IN ACCIAIO | Bullonature 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 1,32 | | |
| | | PAVIMENTAZIONE IN PANNELLI IN VETRO | Adesivi 20% - Trasporto con dispositivi di sollevamento 80% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,44 | | |
| | | GRADINI IN CLS | Leganti idraulici e aerei | 0,00 | | 0,03 |
| | | SOLETTA RAMPANTE IN CLS | Leganti idraulici e aerei | 0,00 | | |
| CHIUSURE ORIZZONTALI INFERIORI | SOLAI A TERRA – SOLAIO TRADIZIONALE IN CLS | MASSETTO IN CEMENTO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 | |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|---|---|--|------|
| | GETTATO IN OPERA | LASTRE DI ISOLAMENTO ACUSTICO PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) GETTO DI CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON PANNELLI PREFABBRICATI IN CLS E CALDANA IN CLS | MASSETTO IN CLS PANNELLI PREFABBRICATI IN CLS CALDANA IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI A TERRA – SOLAIO TRADIZIONALE IN CLS GETTATO IN OPERA | MASSETTO IN CEMENTO LASTRE DI ISOLAMENTO ACUSTICO PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) BLOCCHI DI EPS GETTO DI CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| CHIUSURE SUPERIORI | SOLAI – SOLAIO CON LAMIERA GRECATA | MEMBRANA IMPERMEABILIZZANTE PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) PANNELLI DI FIBROCEMENTO PANNELLI IN FIBRA DI LEGNO PANNELLI IN EPS LAMIERE GRECATE | Materiale pericoloso (discarica/valorizzatore) Materiale a contatto con materiale pericoloso Adesivi 20% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% Adesivi 20% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% Avvitature difficilmente accessibili 60% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% Avvitature difficilmente accessibili 60% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,00 0,00 0,40 0,40 0,64 0,64 | 0,27 |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI LEGGERE 'A SECCO' | MODULI IN VETRO E ALLUMINIO INTELLAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% Avvitature 80% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 0,68 0,72 | 0,62 |

| | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------|---|------|------|
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | INTONACO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | PANNELLI PREFABBRICATI IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| CHIUSURE VERTICALI | SISTEMA 'CURTAIN WALL' | PANNELLI IN POLICARBONATO | Incastri a scatto 100% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80% | 0,88 | 0,70 |
| | | INTELLAIATURA IN ALLUMINIO | Avvitature 80% - Trasporto al suolo e caricamento su autocarro con auto-grù 60% - Taglio di parti forate 60% | 0,72 | |
| | PARETI PESANTI 'A UMIDO' | INTONACO | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | 0,00 |
| | | LATERIZI | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0,00 | |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | FINESTRE AD ANTA FISSA | Avvitature 80% - Elementi fragili 20% - Rimozione di imperfezioni superficiali, parti danneggiate 80 | 0,68 | 0,62 |

TAB. 11 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ MSI METODO SPERIMENTALE INTEGRATO DEL SECONDO CASO STUDIO

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO UNI materiali prevalenti | METODO UNI Unità tecnologica |
|--------------------------------|---|---|--|---------------------------------------|---------------------------------|
| STRUTTURE DI ELEVAZIONE | VERTICALI E ORIZZONTALI | PILASTRI IN ACCIAIO TRAVI IN ACCIAIO | Bullonature Bullonature | 3 3 | 3 (0,60) |
| PARTIZIONI ESTERNE INCLINATE | SCALE ESTERNE | GRADINI E PIANEROTTOLI IN ACCIAIO TRAVI IN ACCIAIO PAVIMENTAZIONE IN PANNELLI IN VETRO GRADINI IN CLS SOLETTA RAMPANTE IN CLS | Bullonature Bullonature Adesivi Leganti idraulici e aerei Leganti idraulici e aerei | 3 3 0 0 0 | 3 (0,60) 0 |
| CHIUSURE ORIZZONTALI INFERIORI | SOLAI A TERRA – SOLAIO TRADIZIONALE IN CLS GETTATO IN OPERA | MASSETTO IN CEMENTO LASTRE DI ISOLAMENTO ACUSTICO PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) GETTO DI CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0 0 | 0 |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | SOLAI – SOLAIO COMPOSITO CON PANNELLI | MASSETTO IN CLS | | | 0 |

| | | | | | |
|--------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|-----------------------|
| | PREFABBRICATI IN CLS E CALDANA IN CLS | PANNELLI PREFABBRICATI IN CLS CALDANA IN CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0 | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI A TERRA – SOLAIO TRADIZIONALE IN CLS GETTATO IN OPERA | MASSETTO IN CEMENTO LASTRE DI ISOLAMENTO ACUSTICO PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) BLOCCHI DI EPS GETTO DI CLS | Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 0 | 0 |
| CHIUSURE SUPERIORI | SOLAI – SOLAIO CON LAMIERA GRECCATA | MEMBRANA IMPERMEABILIZZANTE PANNELLI DI MATERIALE ISOLANTE (PUR) PANNELLI DI FIBROCEMENTO PANNELLI IN FIBRA DI LEGNO PANNELLI IN EPS LAMIERE GRECCATE | Materiale pericoloso (discarica/valorizzatore) Materiale a contatto con materiale pericoloso Adesivi Adesivi Avvitature Avvitature | 0 0 0 3 3 | 0 (0,16) |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI LEGGERE 'A SECCO' PARETI PESANTI 'A UMIDO' PARETI PESANTI 'A UMIDO' | MODULI IN VETRO E ALLUMINIO INTELAIATURA IN ALLUMINIO INTONACO LATERIZI PANNELLI PREFABBRICATI IN CLS | Avvitature Avvitature Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 3 3 0 0 0 | 1 (0,60) 0 |
| CHIUSURE VERTICALI | SISTEMA 'CURTAIN WALL' PARETI PESANTI 'A UMIDO' | PANNELLI IN POLICARBONATO INTELAIATURA IN ALLUMINIO INTONACO LATERIZI | Incastri a scatto Avvitature Leganti idraulici e aerei (da riciclare) Leganti idraulici e aerei (da riciclare) | 3 3 0 0 | 3 (0,60) 0 |

| | | | | | |
|--|---------------------------|------------------------|------------|---|----------|
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | FINESTRE AD ANTA FISSA | Avvitature | 3 | 3 (0,60) |
|--|---------------------------|------------------------|------------|---|----------|

TAB. 12 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ METODO UNI DEL SECONDO CASO STUDIO

3° CASO STUDIO (LEGNO) – VILLA GP

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO SPERIMENTALE INTEGRATO materiali prevalenti | MSI Unità tecnologica |
|--------------------------------|-------------------------|---|---|--|--------------------------|
| PARTIZIONI INTERNE INCLINATE | SCALE INTERNE | PIASTRA IN ACCIAIO | Bullonatura 75% - Trasporto manuale 100% - Pulitura generale 100% | 0,85 | 0,75 |
| | | TONDINI IN ACCIAIO | Saldatura 25% - Trasporto manuale 100% - Rimozione di parti saldate 25% | 0,40 | |
| | | PEDATE IN LEGNO DI NOCE | Semplice incastro 100% - Trasporto manuale 100% - Pulitura generale 100% | 1,00 | |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | BALCONI | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,71 | 0,75 |
| | | CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,81 | |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,51 | |
| | ELEMENTI DI PROTEZIONE | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | 0,54 |
| | LASTRA DI VETRO | Bullonatura 75% - Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento 20% - taglio di parti forate 25% | 0,54 | | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI | TRAVI IN LEGNO DI ABETE LAMELLARE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Pialatura 50% | 0,67 | 0,71 |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Taglio di parti forate 25% | 0,51 | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| CHIUSURE SUPERIORI | COPERTURE | TRAVI IN LEGNO DI ABETE LAMELLARE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Pialatura 50% | 0,67 | 0,71 |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Taglio di parti forate 25% | 0,51 | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI INTERNE A TELAIO | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m | 0,67 | 0,70 |

| | | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|--|------|------|
| | | CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m | 0,67 | |
| | | PANNELLI OSB | 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,51 | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | PARETI INTERNE IN CARTONGESSO | MONTANTI IN ACCIAIO ZINCATO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,83 | |
| | | GUIDE IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 90% - Pulitura generale 100% | 0,83 | 0,83 |
| | | ISOLAMENTO IN LANA DI ROCCIA | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 90% - Pulitura generale 100% | 0,98 | |
| | | LASTRE IN CARTONGESSO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 90% - Pulitura generale 100% | 0,68 | |
| | INFISSI INTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 90% - Taglio di parti forate 25% | 0,84 | |
| | | PORTA A BATTENTE IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione 100% - Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento 20% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | 0,86 |
| | | TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | | |

| | | | | | |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|------|------|
| CHIUSURE VERTICALI | PARETI PERIMETRALI VERTICALI | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,67 | 0,70 |
| | | CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,67 | |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,51 | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,84 | 0,86 |
| | | PORTA A BATTENTE IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |

TAB. 13 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ MSI METODO SPERIMENTALE INTEGRATO DEL TERZO CASO STUDIO

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO UNI materiali prevalenti | METODO UNI Unità tecnologica |
|--------------------------------|------------------------|--|--|--|---------------------------------|
| PARTIZIONI INTERNE INCLINATE | SCALE INTERNE | PIASTRA IN ACCIAIO TONDINI IN ACCIAIO PEDATE IN LEGNO DI NOCE | Bullonatura Saldatura Semplice incastro | 3 (0,6 in percentuale) 0 (0) 3 (0,6) | 2 (0,4 in percentuale) |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | BALCONI | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA PANNELLI OSB | Avvitature Avvitature Chiodature | 3 (0,6) 3 (0,6) 3 (0,6) | 3,5 (0,7) |
| | ELEMENTI DI PROTEZIONE | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione Bullonatura | 5 (1) 3 (0,6) | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|-----------|
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI | TRAVI IN LEGNO DI ABETE LAMELLARE | Avvitature | 3 (0,6) | 3,7 (0,7) |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature | 3 (0,6) | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | |
| CHIUSURE SUPERIORI | COPERTURE | TRAVI IN LEGNO DI ABETE LAMELLARE | Avvitature | 3 (0,6) | 3,7 (0,7) |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature | 3 (0,6) | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI INTERNE A TELAIO | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature | 3 (0,6) | 3,5 (0,7) |
| | | CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature | 3 (0,6) | |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature | 3 (0,6) | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | |
| | PARETI INTERNE IN CARTONGESSO | MONTANTI IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature | 3 (0,6) | 3,5 (0,7) |
| | | GUIDE IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature | 3 (0,6) | |
| | | ISOLAMENTO IN LANA DI ROCCIA | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | |
| | | LASTRE IN CARTONGESSO | Avvitature | 3 (0,6) | |
| | INFISSI INTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | 4 (0,8) |
| | | PORTA A BATTENTE IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature | 3 (0,6) | |
| | | TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature | 3 (0,6) | |

| | | | | | |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|------|------|
| CHIUSURE VERTICALI | PARETI PERIMETRALI VERTICALI | MONTANTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,67 | 0,70 |
| | | CORRENTI IN LEGNO DI ABETE BILAMA | Avvitature 75% - trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Trattamento impregnante a spruzzo 75% | 0,67 | |
| | | PANNELLI OSB | Chiodature 50% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,51 | |
| | | ISOLAMENTO IN FIBRA DI LEGNO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,84 | 0,86 |
| | | PORTA A BATTENTE IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |

TAB. 14 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ METODO UNI DEL TERZO CASO STUDIO

4° CASO STUDIO (LEGNO) – COMPLESSO CENNI

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO SPERIMENTALE INTEGRATO materiali prevalenti | MSI Unità tecnologica |
|--------------------------------|------------------------|----------------------|--|--|--------------------------|
| STRUTTURA IN ELEVAZIONE | STRUTTURA VERTICALE | PILASTRI IN C.A. | Leganti idraulici e aerei (0%) – Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento (80%) – frantumazione (50%) | 0,26 | 0,26 |
| | STRUTTURA ORIZZONTALE | TRAVI IN C.A. | Leganti idraulici e aerei (0%) – Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento (80%) – frantumazione (50%) | 0,26 | 0,26 |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | BALCONI | PANNELLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate provocate da unioni avvitate 25% e Trattamento impregnante 75% | 0,67 | 0,67 |
| | ELEMENTI DI PROTEZIONE | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione 100% - Elementi fragili 20% - Pulitura generale 100% | 0,84 | 0,87 |
| | | TUBOLARI IN ACCIAIO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento (80%) – Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | FRANGISOLE ALLUMINIO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento (80%) – Pulitura generale 100% | 0,96 | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|------|------|
| | | | | | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI X-LAM | PANNELLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Piallatura 50% e Trattamento impregnante 75% | 0,67 | 0,67 |
| | SOLAIO IN CLS | LASTRE PRE-DALLE | Leganti idraulici e aerei 0% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Non riutilizzabile 0% | 0,16 | 0,16 |
| | | SOLETTA CLS | Leganti idraulici e aerei 0% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Non riutilizzabile 0% | | |
| CHIUSURE SUPERIORI | COPERTURE | PANNELLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% e Piallatura 50% e Trattamento impregnante 75% | 0,67 | 0,67 |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI INTERNE X-LAM | PANNELLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% - Piallatura 50%- Trattamento impregnante 75% | 0,67 | 0,81 |
| | PARETI INTERNE IN CARTONGESSO | MONTANTI IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | GUIDE IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | ISOLAMENTO IN LANA DI ROCCIA | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | | LASTRE IN CARTONGESSO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Taglio di parti forate 25% | 0,66 | |
| | INFISSI INTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione 100% - Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento 20% - Pulitura generale 100% | 0,84 | |
| | | PORTA IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione 100% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,96 | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| | | | | | 0,86 |

| | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|---------------------|---|------|------------------|
| CHIUSURA VERTICALE | PARETI PERIMETRALI | PANNELLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 60% - Taglio di parti forate 25% - Piattatura 50%- Trattamento impregnante 75% | 0,67 | 0,67 0,83 |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione 100% - Elementi fragili, alta probabilità di danneggiamento 20% - Pulitura generale 100% | 0,84 | |
| | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature 75% - Trasporto al suolo con dispositivi di sollevamento 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |
| PARTIZIONE INTERNA INCLINATA | SCALE INTERNE | RAMPA X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 80% - Taglio di parti forate 25% - Piattatura 50%- Trattamento impregnante 75% | 0,71 | 0,74 |
| | | PIANEROTTOLO X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 80% - Taglio di parti forate 25% - Piattatura 50%- Trattamento impregnante 75% | 0,71 | |
| | | GRADINI X-LAM | Avvitature 75% - Trasporto al suolo e caricamento su autoarticolato con auto-grù L<14m 80% - Pulitura generale 100% | 0,81 | |

TAB. 15 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ MSI METODO SPERIMENTALE INTEGRATO DEL QUARTO CASO STUDIO

| UNITA' TECNOLOGICA | ELEMENTO TECNICO | MATERIALI PREVALENTI | PARAMETRI Tecnologia di posa in opera – Movimentazione e Trasporto – Modifica in officina | METODO UNI materiali prevalenti | METODO UNI Unità tecnologica |
|--------------------------------|--|--|--|------------------------------------|---------------------------------|
| STRUTTURA IN ELEVAZIONE | STRUTTURA VERTICALE STRUTTURA ORIZZONTALE | PILASTRI IN C.A. | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | TRAVI IN C.A. | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| PARTIZIONI ESTERNE ORIZZONTALI | BALCONI | PANNELLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) |
| | ELEMENTI DI PROTEZIONE | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | 4,3 (0,86) |
| | | TUBOLARI IN ACCIAIO FRANGISOLE ALLUMINIO | Avvitature Semplice sovrapposizione | 3 (0,6) 5 (1) | |
| PARTIZIONI INTERNE ORIZZONTALI | SOLAI X-LAM | PANNELLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) |
| | SOLAIO IN CLS | LASTRE PRE-DALLE SOLETTA CLS | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |
| | | | Leganti idraulici e aerei | 0 | 0 |

| | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|--|------------------------------|--------------------------|-----------|---------|
| CHIUSURE SUPERIORI | COPERTURE | PANNELLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) | |
| PARTIZIONI INTERNE VERTICALI | PARETI INTERNE X-LAM | PANNELLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) | |
| | | PARETI INTERNE IN CARTONGESSO | MONTANTI IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature | | 3 (0,6) |
| | | | GUIDE IN ACCIAIO ZINCATO | Avvitature | | 3 (0,6) |
| | | | ISOLAMENTO IN LANA DI ROCCIA | Semplice sovrapposizione | | 5 (1) |
| | INFISSI INTERNI VERTICALI | LASTRE IN CARTONGESSO | Avvitature | 3 (0,6) | 3,5 (0,7) | |
| | | | LASTRA DI VETRO | Semplice sovrapposizione | | 5 (1) |
| | | PORTA IN TAMBURATO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | | 4 (0,8) |
| | | | TELAIO IN ALLUMINIO | Avvitature | | |
| TELAIO IN LEGNO DI ROVERE | Avvitature | 3 (0,6) | | | | |
| CHIUSURA VERTICALE | PARETI PERIMETRALI | PANNELLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) | |
| | INFISSI ESTERNI VERTICALI | LASTRA DI VETRO TELAIO IN ALLUMINIO | Semplice sovrapposizione | 5 (1) | 4 (0,8) | |
| Avvitature | | | 3 (0,6) | | | |
| PARTIZIONE INTERNA INCLINATA | SCALE INTERNE | RAMPA X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | 3 (0,6) | |
| | | PIANEROTTOLO X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | | |
| | | GRADINI X-LAM | Avvitature | 3 (0,6) | | |

TAB. 16 CALCOLO LIVELLO DI DISASSEMBLABILITÀ METODO UNI DEL QUARTO CASO STUDIO

3° fase

3° fase STIMA DELLE EMISSIONI DI CO_{2eq}

$$\sum \mathbf{CO_{2eq}} = \mathbf{CO_{2eq1}} + \mathbf{CO_{2eq2}} + \mathbf{CO_{2eq3}} + \mathbf{CO_{2eq4}}$$

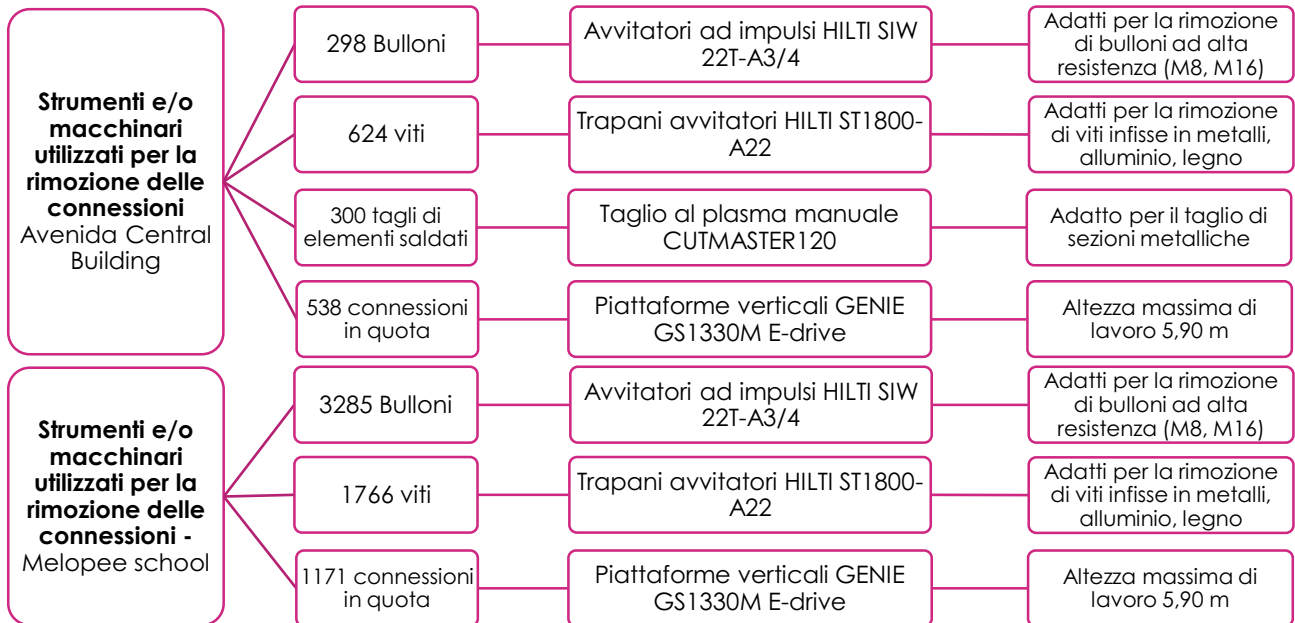
- aliquota di emissioni di CO_{2eq1} prodotte dall'attività di demolizione;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq2} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq3} prodotte dal trasporto fuori dal sito;
- aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo.

CASI STUDIO IN ACCIAIO (Avenida Central Building e Melopee School)

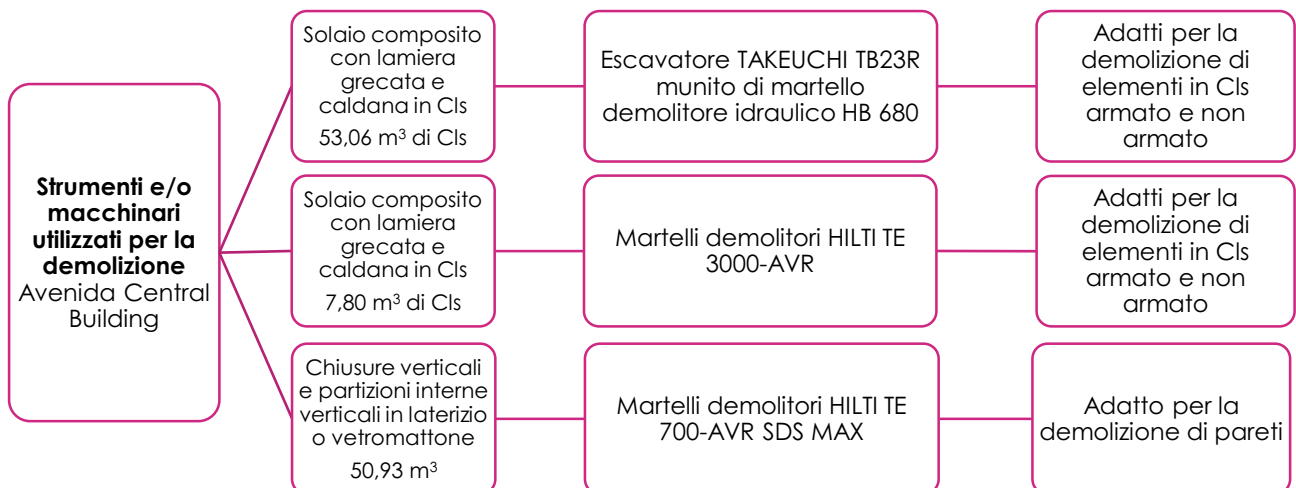
Aliquota di emissioni di CO_{2eq1} prodotte dall'attività di demolizione

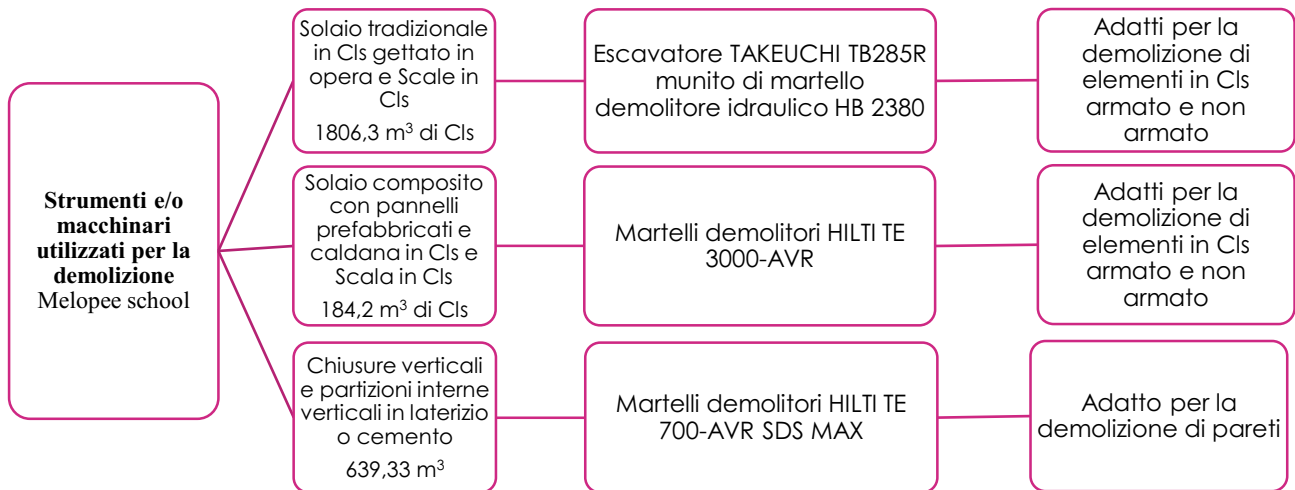
Al fine di associare a ciascun materiale prevalente un tipo di lavorazione necessaria per il disassemblaggio e la demolizione selettiva, l'attività di demolizione è stata suddivisa in due operazioni di demolizione: rimozione delle connessioni e trasporto al suolo e caricamento su un autocarro o su un autoarticolato di un elemento o di un gruppo di elementi.

Rimozione delle connessioni

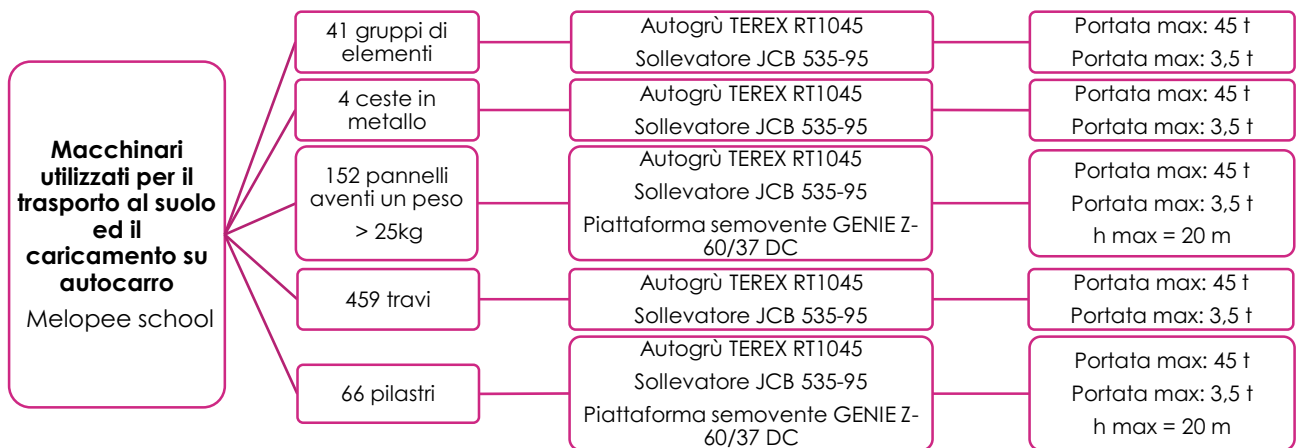
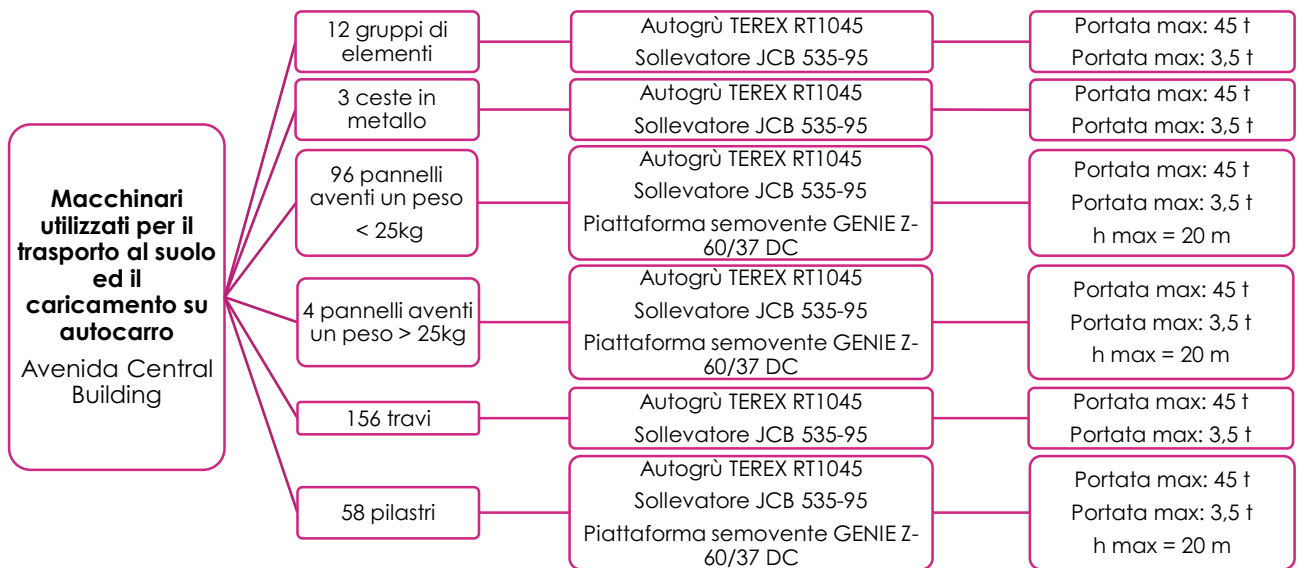


Quantificato il numero di connessioni e determinati i tempi complessivi di funzionamento di ciascun strumento e/o macchinario scelto, attraverso la conoscenza del tipo di alimentazione dello strumento o del macchinario utilizzato e del rispettivo fattore di emissione è stato possibile quantificare le emissioni di CO_{2eq1}. In un secondo momento sono stati quantificati i volumi di materiale da demolire, al fine di determinare i tempi complessivi di funzionamento di strumenti e/o macchinari utilizzati per la demolizione associati al tipo di materiale e alla tecnologia costruttiva da demolire. [Per i calcoli completi visionare la sezione Allegati]





Trasporto al suolo e caricamento su un autocarro o su un autoarticolato di un elemento o di un gruppo di elementi



Per ciascuna categoria di materiali prevalenti è stato quantificato il numero di elementi o gruppi di elementi da trasportare al suolo al fine di determinare i tempi complessivi di funzionamento dei macchinari utilizzati per il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro o su autoarticolato. Quantificato il numero di elementi o gruppi di elementi e determinati i tempi complessivi di funzionamento di ciascun macchinario scelto, attraverso la conoscenza del tipo di alimentazione del macchinario utilizzato e del rispettivo fattore di emissione è stato possibile quantificare le emissioni di CO_{2eq}. [Per i calcoli completi visionare la sezione Allegati].

Si riporta, per entrambi i casi studio selezionati, una sintesi delle emissioni dell' aliquota CO_{2eq1} prodotte dall'attività di demolizione.

Avenida Central Building

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla rimozione delle connessioni | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di utensili a batteria per rimozione di bullonatura, avvistature | 0,1 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di utensili elettrici per la rimozione di saldature | 28 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di utensili elettrici per la demolizione di pareti o lastre in cls | 54 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di mini-escavatori per la demolizione di partizioni e chiusure | 526 |
| TOTALE | 608,1 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di gruppi di elementi | 16 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di ceste in metallo | 7 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pannelli aventi un peso < 25 kg | 34 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pannelli aventi un peso > 25 kg | 20 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di travi e travetti | 590 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pilastri | 46 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di travi della scala esterna | 84 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di travi della gabbia ascensore | 47 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pilastri della gabbia ascensore | 12 |
| TOTALE | 856 |

TAB. 17 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLA RIMOZIONE DELLE CONNESSIONI E DAL TRASPORTO AL SUOLO E CARICAMENTO SU AUTOCARRO DEL PRIMO CASO STUDIO

Melopee School

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla rimozione delle connessioni | kgCO_{2eq} |
|---|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di utensili a batteria per rimozione di bullonatura, avvistature | 0,1 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di utensili elettrici per la demolizione di pareti in laterizio o lastre in cls | 1387 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'utilizzo di mini-escavatori per la demolizione di partizioni e chiusure orizzontali | 15069 |
| TOTALE | 16456,1 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di gruppi di elementi (pannelli di materiale isolante, lamiera grecate, intelaiature metalliche) | 81 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di ceste in metallo | 9 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pannelli aventi un peso > 25 kg | 673 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di travi e travetti | 1759 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di pilastri | 420 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dalla movimentazione di travi della scala esterna | 31 |
| TOTALE | 2973 |

TAB. 18 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLA RIMOZIONE DELLE CONNESSIONI E DAL TRASPORTO AL SUOLO E CARICAMENTO SU AUTOCARRO DEL SECONDO CASO STUDIO

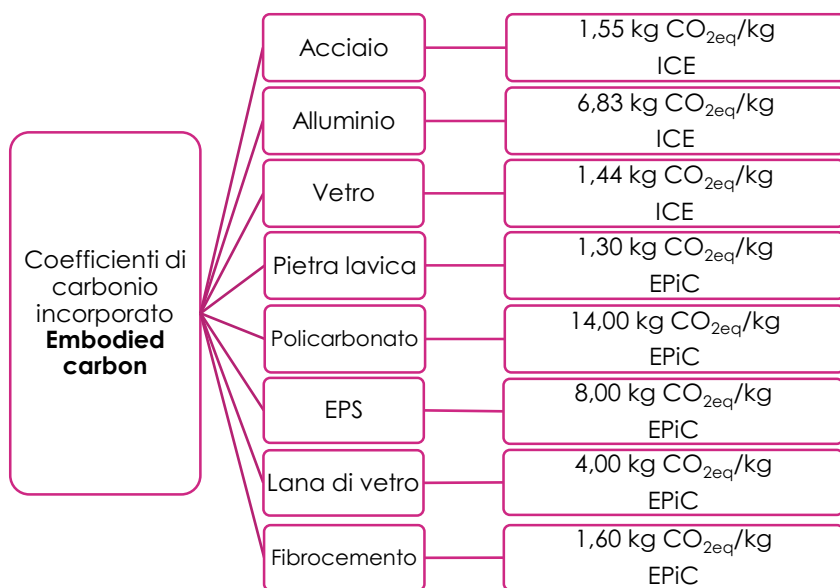
Aliquota di emissioni di CO_{2eq2} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione

Le attività di demolizione (rimozione delle connessioni e trasporto al suolo e caricamento su autocarro o autoarticolato di singoli elementi o gruppi di elementi) possono generare uno

sfrido, ovvero una percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato. L'aliquota di emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione corrisponde alle emissioni incorporate nella percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato.

In una prima fase, per ciascun materiale prevalente, è stata quindi calcolata la percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato, quest'ultima pari alla differenza tra la percentuale di materiale completamente riutilizzabile (100%) e la percentuale di materiale riutilizzabile desunta dall'indice di riutilizzabilità (%IR).

I coefficienti di carbonio incorporato utilizzati sono desunti dall'Inventory of Carbon and Energy (ICE) [rif], database del carbonio incorporato per oltre 200 materiali da costruzione elaborato dall'Università di Bath, e dall'Environmental Performance in Construction (EPiC) [rif], inventario del ciclo di vita per oltre 100 materiali da costruzione elaborato dall'Università di Melbourne. [Per i calcoli completi si rimanda alla sezione Allegati].



Avenida Central Building

| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | kgCO _{2eq} |
|---|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi della struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) | 30890 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi della scala esterna (travi, travi a ginocchio) | 947 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi della gabbia ascensore (travi, pilastri) | 1411 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido della pavimentazione in pietra lavica | 1316 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi delle chiusure verticali (pannelli U-Glass) | 1287 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido dell'intelaiatura metallica dei pannelli U-Glass | 344 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido del vetro degli infissi verticali e delle pareti leggere a secco | 939 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'intelaiatura metallica degli infissi e delle pareti leggere a secco | 6316 |
| TOTALE | 43450 |

TAB. 19 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE DEL PRIMO CASO STUDIO

Melopee School

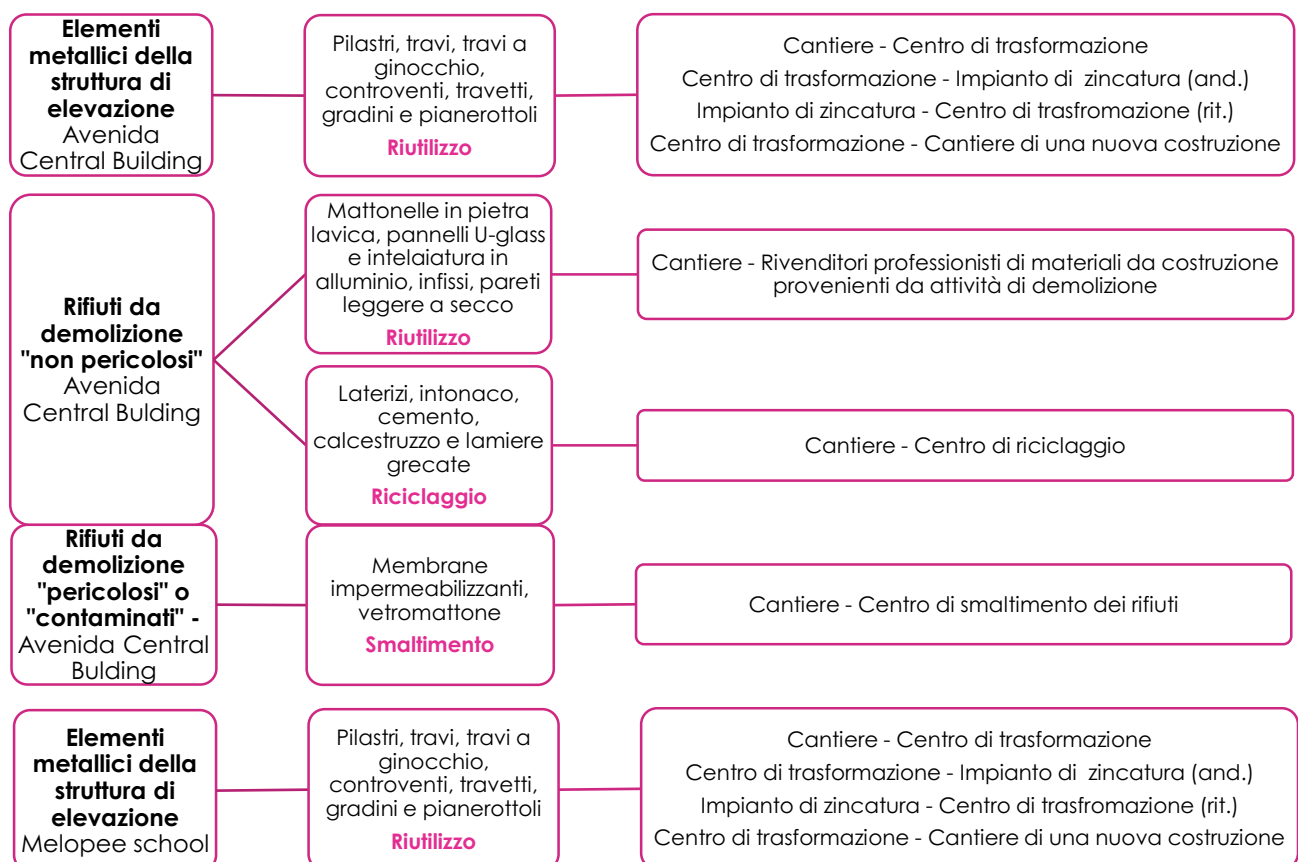
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | kgCO _{2eq} |
|---|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi della struttura di elevazione (travi, travetti, pilastri) | 92061 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli elementi della scala esterna (travi, travi a ginocchio) | 2941 |

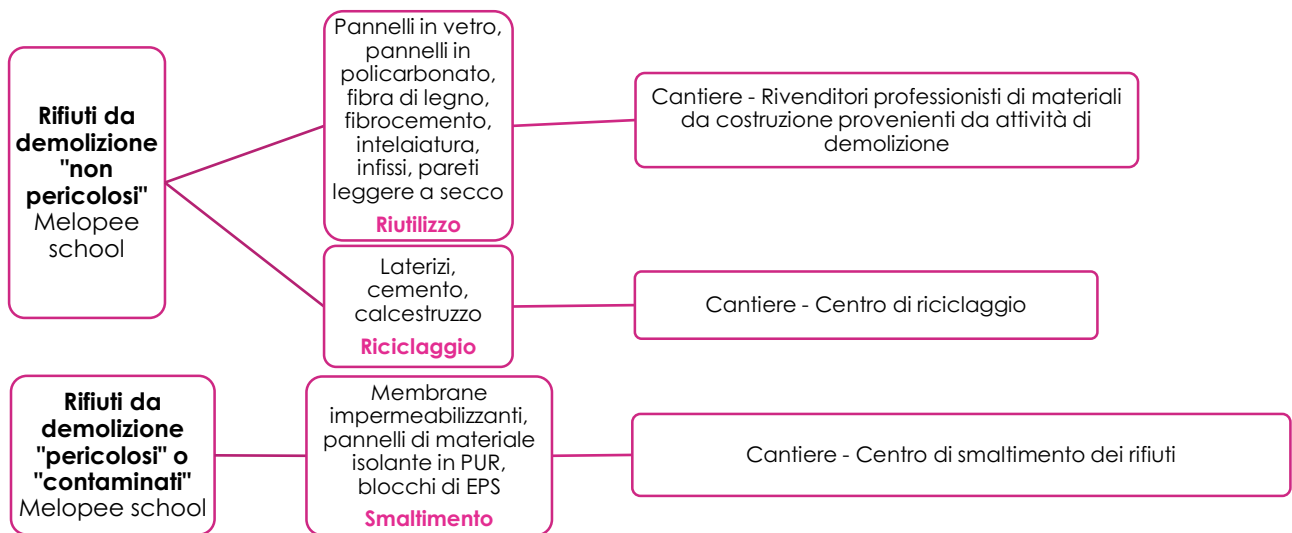
| | |
|--|---------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido degli elementi di chiusure verticali (pannelli in polycarbonato) | 13157 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido dell'intelaiatura metallica dei pannelli in polycarbonato | 2951 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido della pavimentazione in vetro antiscivolo | 10160 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido del vetro degli infissi verticali e delle pareti leggere a secco | 13180 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido dell'intelaiatura metallica degli infissi e delle pareti leggere a secco | 38427 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido dei pannelli in fibra di legno | 17971 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido dei pannelli in fibrocemento | 20218 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido dei pannelli per isolamento acustico EPS | 3430 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfido delle lamiere grecate | 9591 |
| TOTALE | 224087 |

TAB. 20 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE DEL SECONDO CASO STUDIO

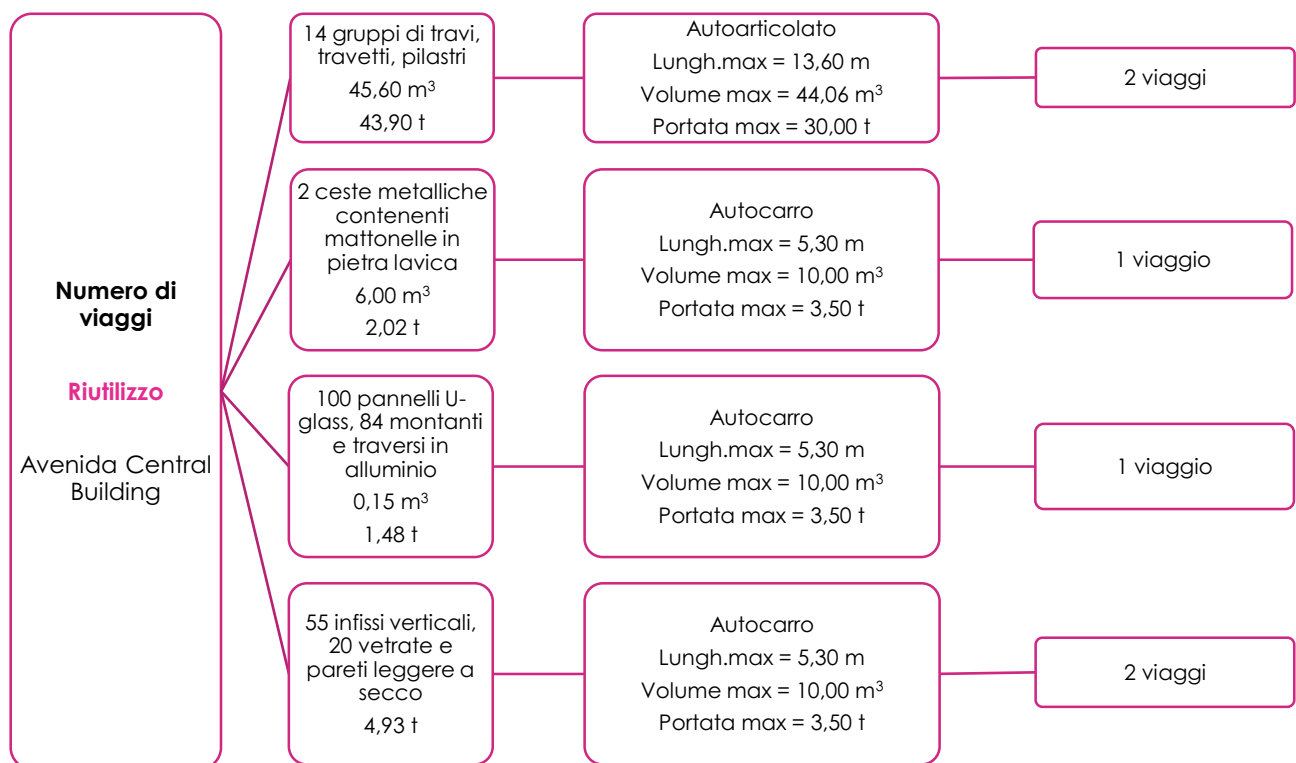
Aliquota di emissioni di CO_{2eq3} prodotte dal trasporto fuori dal sito

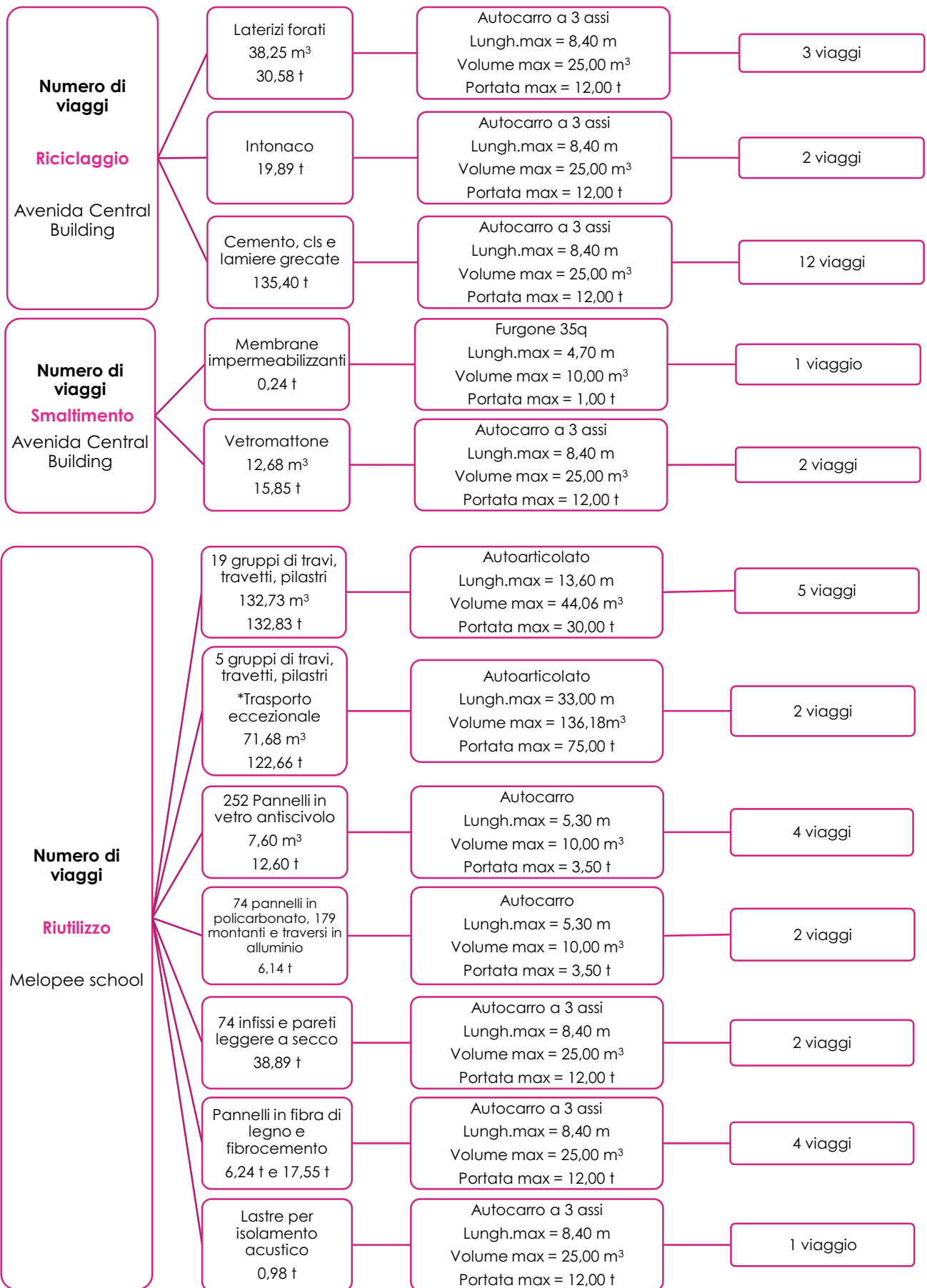
La fase successiva alla conclusione delle attività di demolizione prevede il trasporto dei rifiuti da demolizione in apposite aree di stoccaggio di centri di trasformazione o di rivenditori professionisti, nel caso di futuro riutilizzo, oppure in centri di riciclaggio nel caso di futuro riciclaggio, ed infine in centri di smaltimento dei rifiuti nel caso di recupero energetico. In una prima fase, per entrambi i casi studio selezionati, i rifiuti da demolizione sono stati classificati, in funzione del tipo di materiale e dei possibili trattamenti richiesti prima della reimmissione nel ciclo produttivo, in tre macrocategorie, a ciascuna delle quali è stata assegnata una destinazione futura. Per ciascuna destinazione, inoltre, sono state definite le tappe percorse dai mezzi di trasporto utilizzati.

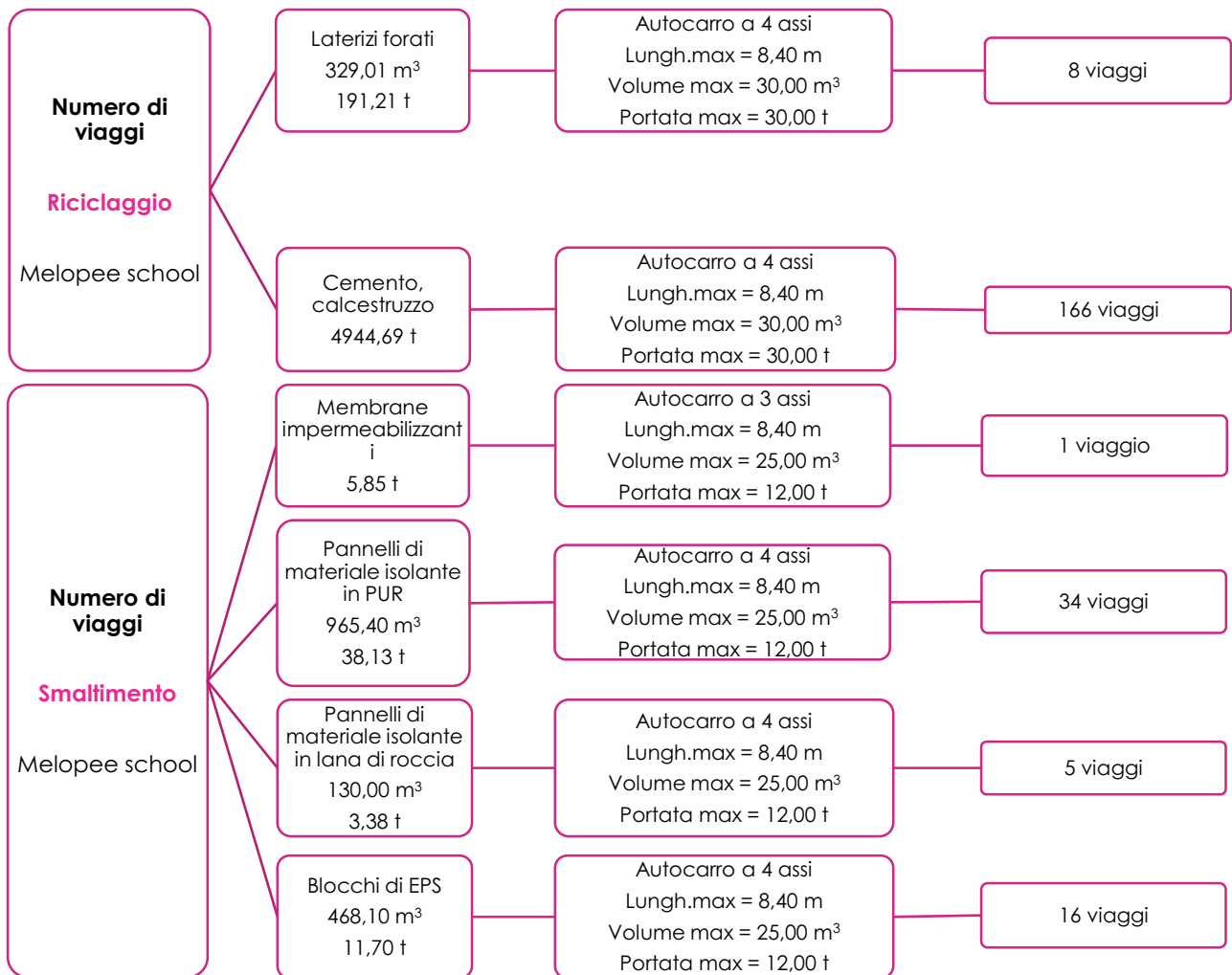




Successivamente, per ciascuna macrocategoria è stato definito il numero di viaggi dal cantiere di demolizione alla futura destinazione. Vengono, dunque, riportati la tipologia di mezzo di trasporto utilizzato e il numero di viaggi dal cantiere di demolizione alla futura destinazione. Ipotizzando una distanza percorsa dai mezzi di trasporto pari al massimo raggio di consegna di centri di trasformazione situati sul territorio italiano (100 km), desunta dall'osservazione di 20 centri di trasformazione individuati attraverso la piattaforma Sicurnet.2 del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti [226] e noti la tipologia di mezzo di trasporto utilizzato ed il numero di viaggi è stato possibile stimare l'aliquota di emissioni di CO_{2eq3} prodotte dal trasporto fuori dal sito come il prodotto tra distanza, numero di viaggi e il fattore di emissione espresso in kgCO_{2eq}/km. [Per i calcoli completi si invita a visionare la sezione Allegati].







Avenida Central Building

| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per successivo riutilizzo | kgCO _{2eq} |
|--|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di elementi della struttura di elevazione | 594 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di piastrelle in pietra lavica | 68 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto dei pannelli U-Glass e dell'intelaiatura metallica | 68 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di infissi e pareti leggere a secco | 135 |
| TOTALE | 865 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per riciclaggio | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di laterizi forati | 203 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di intonaco | 135 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di cemento, calcestruzzo e lamiera grecate | 811 |
| TOTALE | 1149 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per smaltimento | |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di membrane impermeabilizzanti | 29 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di vetromattone | 135 |
| TOTALE | 164 |

TAB. 21 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO DEL PRIMO CASO STUDIO

Melopee School

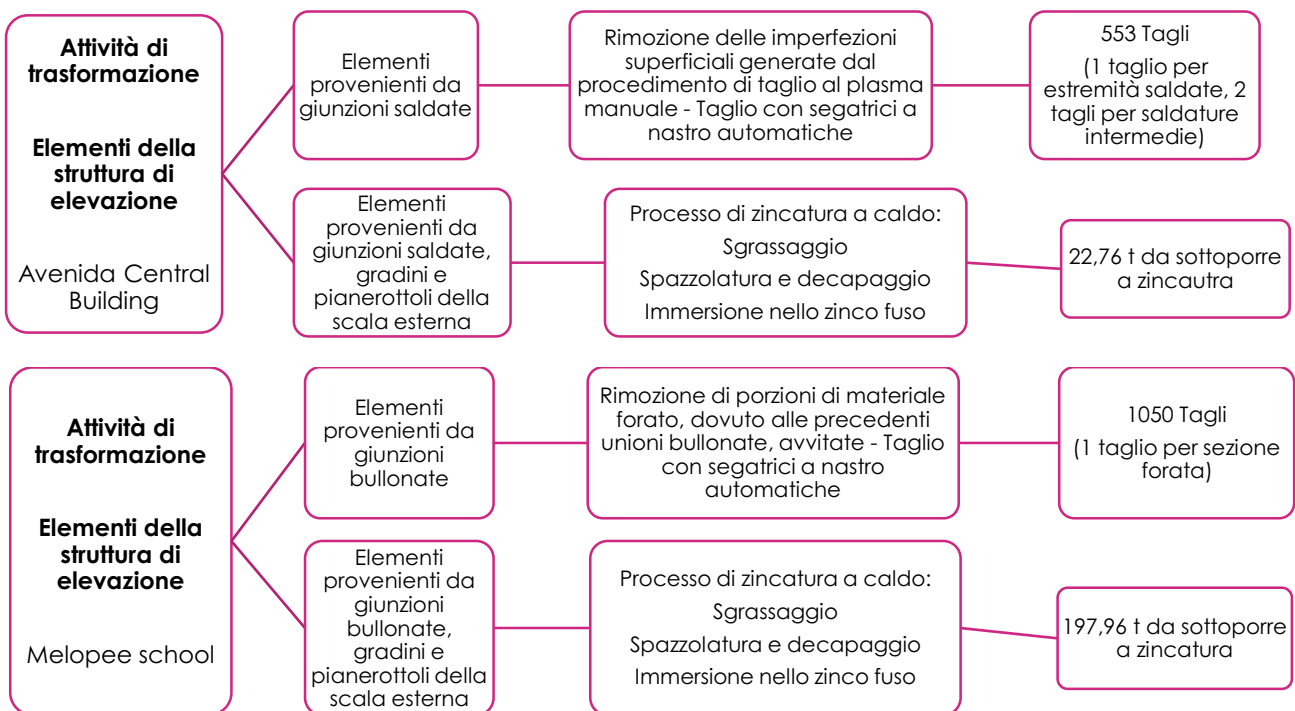
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per successivo riutilizzo | kgCO _{2eq} |
|---|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di elementi della struttura di elevazione | 2630 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli in vetro antiscivolo | 270 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto dei pannelli in policarbonato e dell'intelaiatura metallica | 135 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di infissi e pareti leggere a secco | 270 |

| | |
|---|--------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli in fibra di legno | 135 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli in fibrocemento | 135 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli per isolamento acustico in EPS | 68 |
| TOTALE | 3643 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per riciclaggio | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di laterizi forati | 840 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di cemento | 4620 |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal trasporto di calcestruzzo | 12810 |
| TOTALE | 18270 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito per smaltimento | |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di membrane impermeabilizzanti | 68 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in PUR | 1680 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in lana di roccia | 525 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di blocchi di EPS | 1680 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in PUR | 1890 |
| TOTALE | 5843 |

TAB. 22 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO DEL SECONDO CASO STUDIO

Aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo

Gli elementi metallici della struttura di elevazione (travi, travetti, travi a ginocchio, pilastri) prima di essere reimmessi in commercio necessitano di attività di trasformazione, eseguite presso centri di trasformazione e impianti di zincatura. In prima istanza, per entrambi i casi studio selezionati, in funzione della provenienza degli elementi della struttura di elevazione, sono state determinate le tipologie di attività di trasformazione ed il numero di operazioni necessarie per il raggiungimento di requisiti progettuali e prestazionali. Dunque, note le tipologie di attività di trasformazione ed il numero di operazioni necessarie, è stato possibile stimare, l'aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo. [Per i calcoli completi visionare la sezione Allegati].



Avenida Central Building

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte da attività di pulizia e taglio presso centri di trasformazione | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalla rimozione delle imperfezioni generate dal procedimento di taglio in cantiere | 24 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal processo di zincatura | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal processo di zincatura | 5896 |

TAB. 23 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI TRASFORMAZIONE DEL PRIMO CASO STUDIO

Melopee School

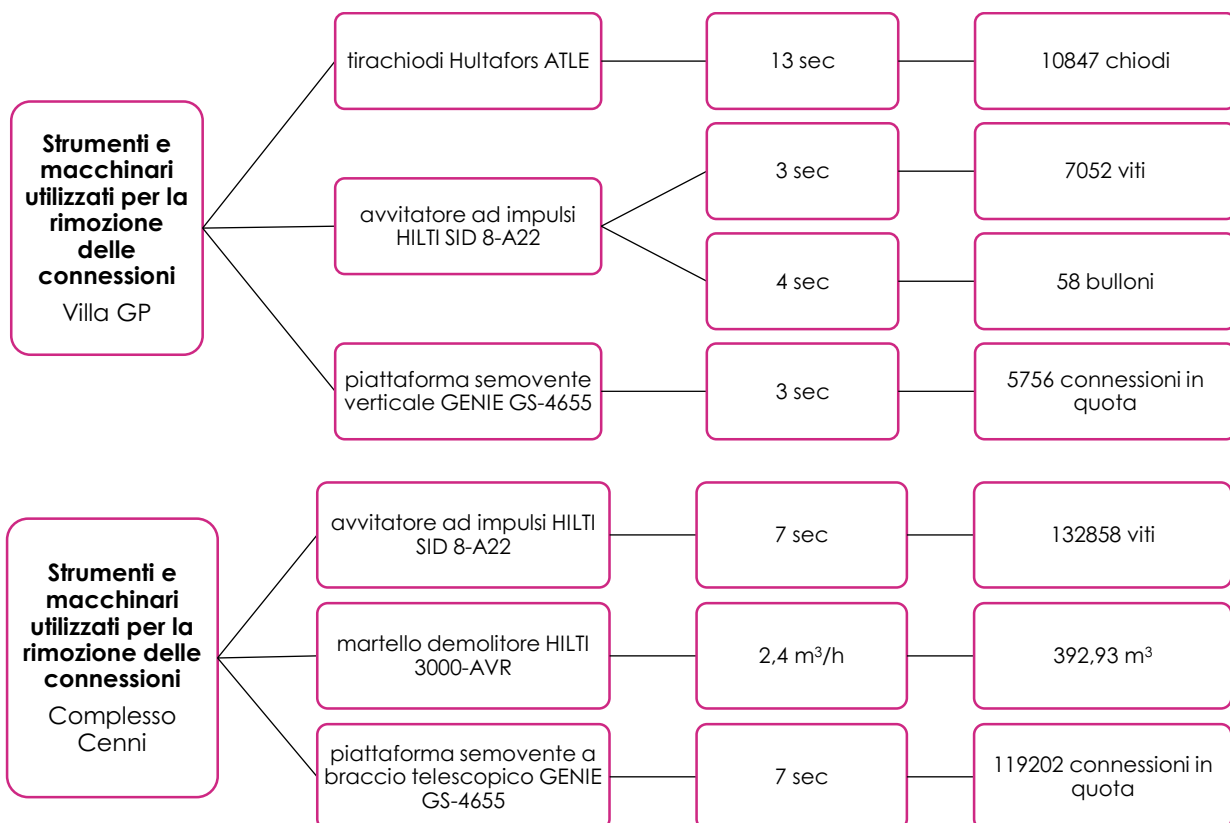
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte da attività di pulizia e taglio presso centri di trasformazione | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal taglio di porzioni di materiale precedentemente bullonate e/o avvitate | 38 |
| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal processo di zincatura | |
| Emissioni di CO _{2eq} generate dal processo di zincatura | 51291 |

TAB. 24 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI TRASFORMAZIONE DEL SECONDO CASO STUDIO

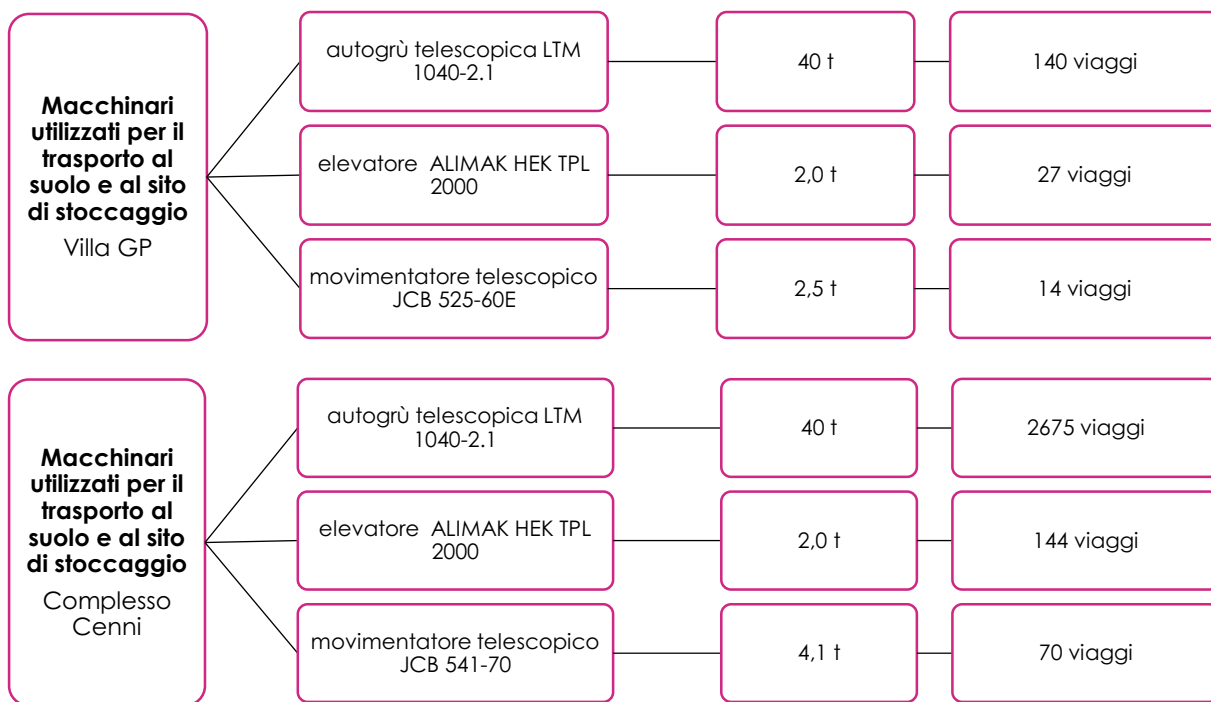
CASI STUDIO IN LEGNO (Villa GP e Complesso Cenni)

Aliquota di emissioni di CO_{2eq1} prodotte dall'attività di demolizione

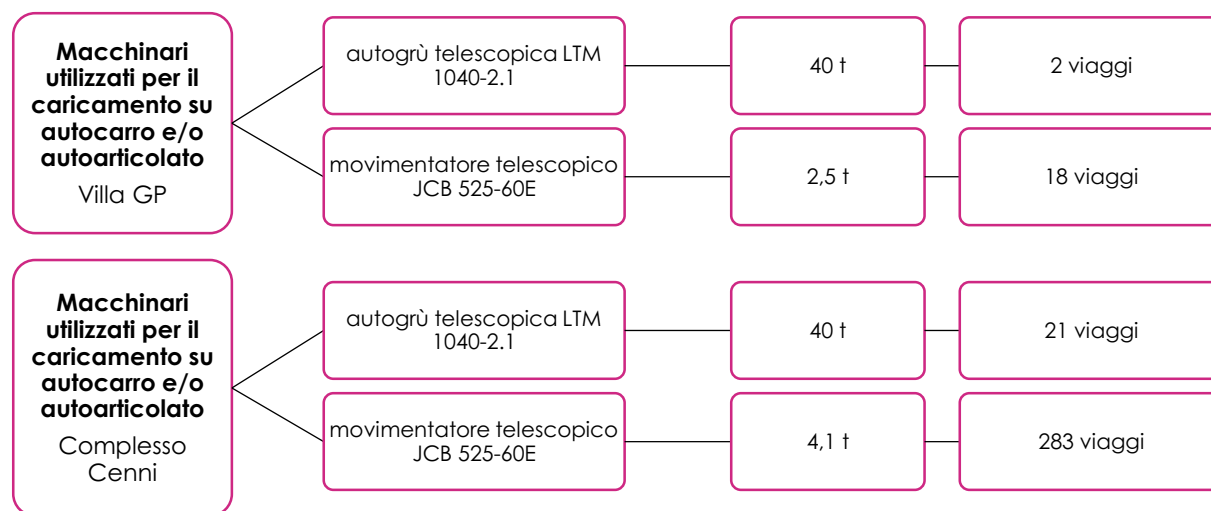
Rimozione delle connessioni



Trasporto al suolo e al sito di stoccaggio interno al cantiere degli elementi tecnici



Caricamento su autocarro e/o su autoarticolato degli elementi tecnici



Si riporta, per entrambi i casi studio selezionati, una sintesi delle emissioni dell' aliquota CO_{2eq1} prodotte dall' attività di demolizione (Tabella n) mentre, per i calcoli completi si invita a visionare la sezione Allegati.

Villa Gp

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dall'attività di demolizione | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalla rimozione delle connessioni (avvitature, chiodature) | 15,86 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto al suolo | 46,05 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal caricamento su autocarro o autoarticolato | 2,20 |
| TOTALE | 64,12 |

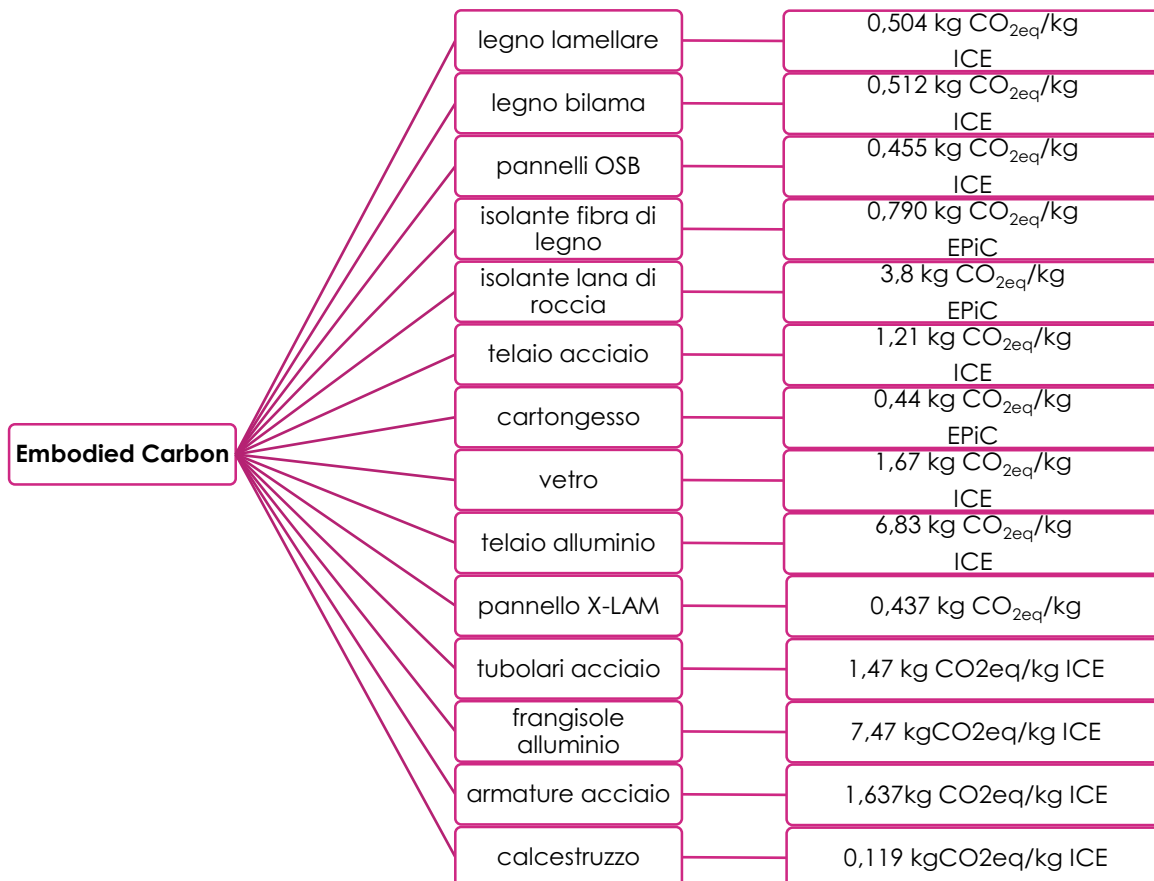
TAB. 25 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE DEL TERZO CASO STUDIO

Complesso Cenni

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dall'attività di demolizione | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalla rimozione delle connessioni (avvitature) | 2425,05 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalla demolizione del cls | 70,92 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto al suolo | 792,56 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal caricamento su autocarro o autoarticolato | 4,24 |
| TOTALE | 3292,76 |

TAB. 26 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE DEL QUARTO CASO STUDIO

Aliquota di emissioni di CO_{2eq2} prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione



Villa GP

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido conseguente le operazioni di demolizione | kgCO_{2eq} |
|---|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido delle pareti perimetrali a telaio | 511,84 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido delle pareti interne a telaio | 32,31 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido delle pareti interne in cartongesso | 64,18 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido dei solai | 252,18 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido della copertura | 310,44 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dallo sfrido degli infissi, dei balconi e delle scale | 102,02 |
| TOTALE | 1272,96 |

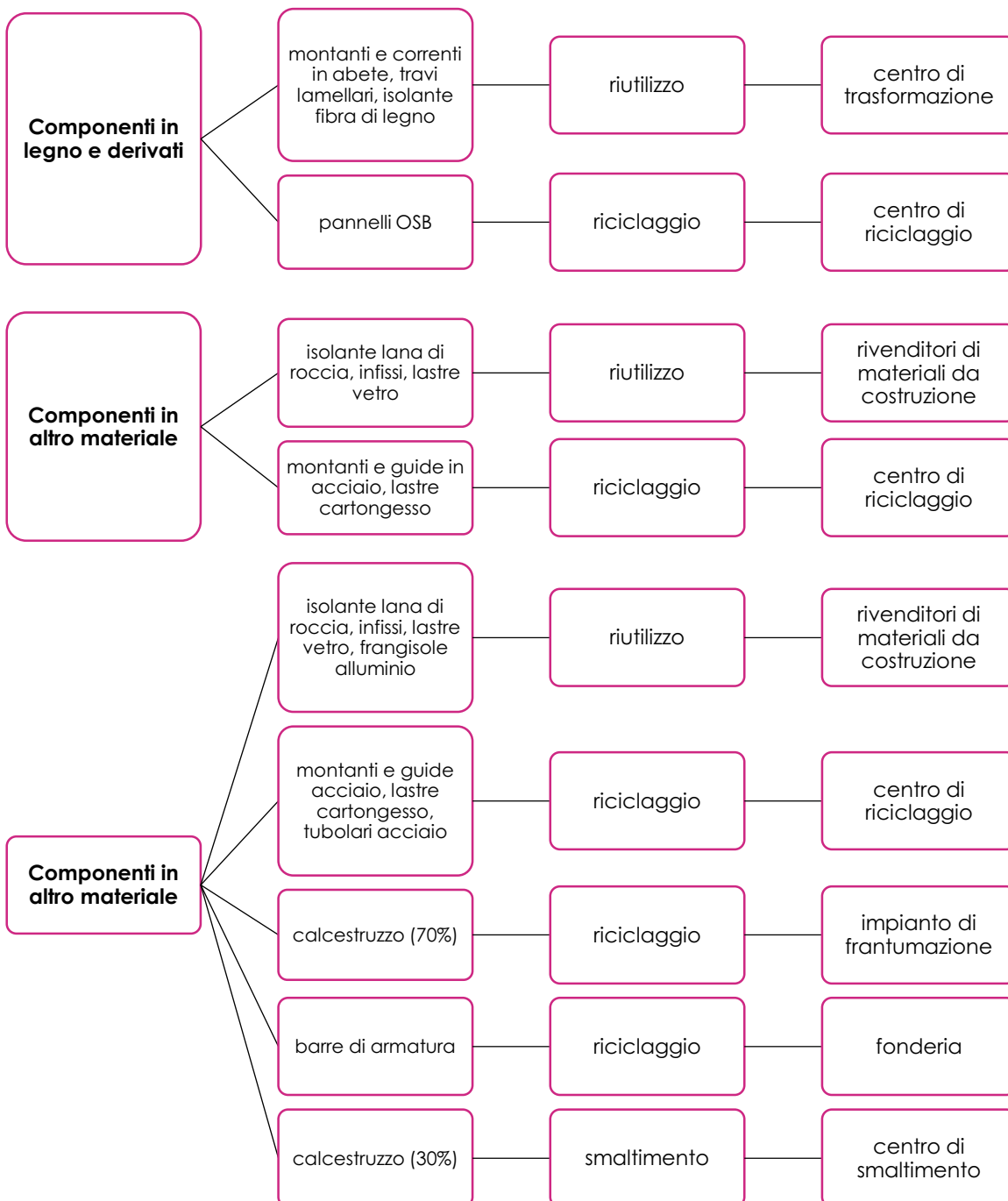
TAB. 27 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE DEL TERZO CASO STUDIO

Complesso Cenni

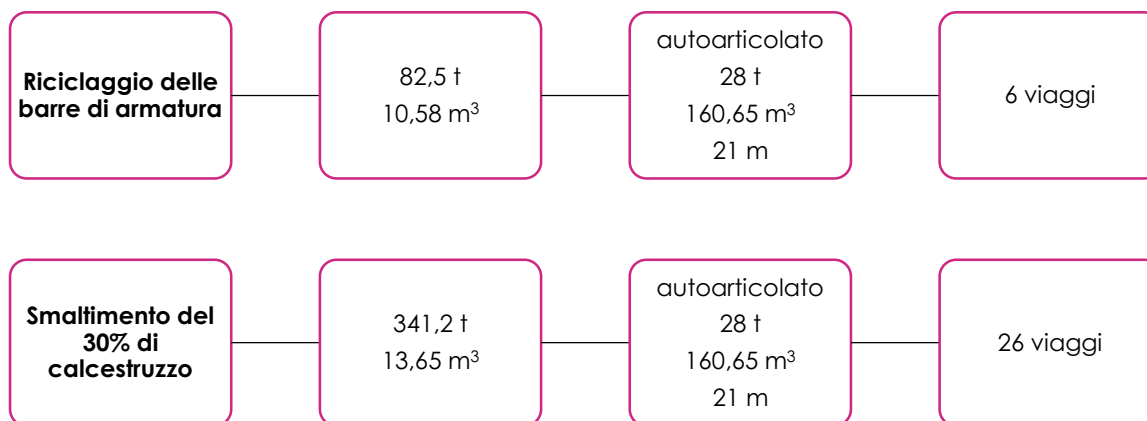
| Emissioni di CO₂eq prodotte dallo sfrido conseguente le operazioni di demolizione | kgCO₂eq |
|---|---------------------------|
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido delle pareti perimetrali in X-LAM | 10109,68 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido delle pareti interne in X-LAM | 6205,05 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido delle pareti interne in cartongesso | 1427,24 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido dei solai | 25606,36 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido della copertura | 869,86 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido della struttura di elevazione in c.a. | 67933,48 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido degli infissi, dei balconi e delle scale | 4960,60 |
| TOTALE | 117112,27 |

TAB. 28 EMISSIONI DI CO₂EQ PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE DEL QUARTO CASO STUDIO

Aliquota di emissioni di CO₂eq₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito



| | | | |
|--|--|--|--------------------------|
| Riutilizzo di componenti in legno e derivati | 22,84 t 116 m ³ 10,6 m | autoarticolato 28 t 92 m ³ 13,6 m | 4 viaggi |
| Riciclaggio di componenti in legno e derivati | 12,57 t 16,77 m ³ 3,6 m | autocarro a 3 assi 12 t 25 m ³ 5,8 m | 4 viaggi |
| Riutilizzo di componenti in altro materiale | 1,38 t 7,14 m ³ 5,0 m | autocarro 3,5 t 10 m ³ 5,3 m | 2 viaggi |
| Riciclaggio di componenti in altro materiale | 1,11 t 1,3 m ³ 3,0 m | autocarro 3,5 t 10 m ³ 5,3 m | 2 viaggi |
| Componenti in legno | pannelli x-lam | riutilizzo | centro di trasformazione |
| Riutilizzo di componenti in legno | 798,25 t 1548,51 m ³ 16 m | autoarticolato per trasporti speciali 28 t 160,65 m ³ 21 m | 58 viaggi |
| Riutilizzo di componenti in altro materiale | 23,27 t 143 m ³ 3 m | autoarticolato 28 t 160,65 m ³ 21 m | 4 viaggi |
| Riciclaggio di componenti in altro materiale | 27,52 t 32 m ³ 8,50 m | autoarticolato 28 t 160,65 m ³ 21 m | 2 viaggi |
| Riciclaggio del 70% di calcestruzzo | 796,23 t 318,5 m ³ | autoarticolato 28 t 160,65 m ³ 21 m | 58 viaggi |



Villa GP

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito | kgCO_{2eq} |
|--|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di montanti e correnti in abete, travi lamellari e isolamento in fibra di legno presso un centro di trasformazione | 528,84 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di pannelli OSB presso un centro di riciclaggio | 389,38 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di montanti e guide in acciaio e lastre in cartongesso presso un centro di riciclaggio | 28,03 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di isolante in lana di roccia, infissi e lastre di vetro presso rivenditori di materiali da costruzione | 42,90 |
| TOTALE | 989,15 |

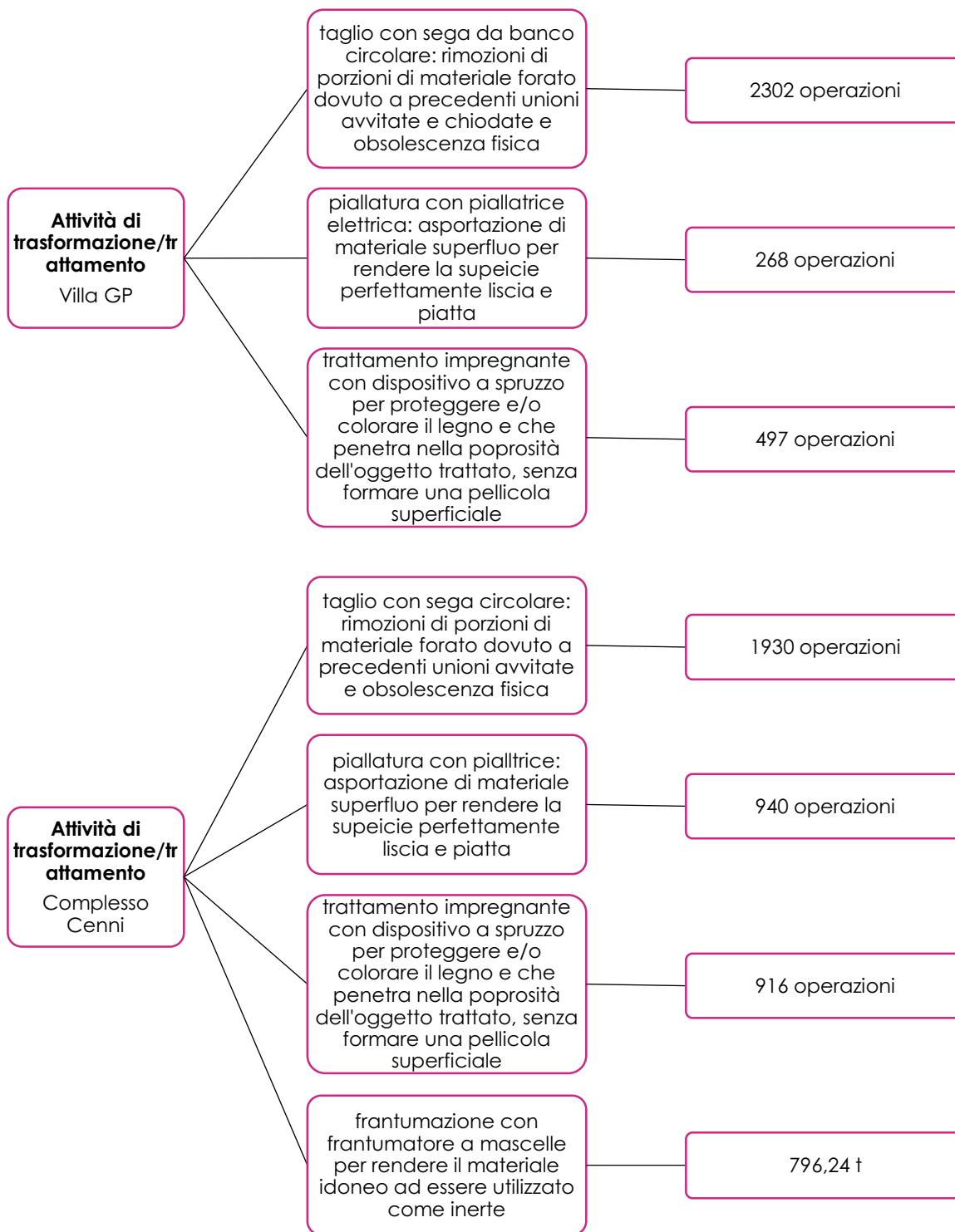
TAB. 29 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO DEL TERZO CASO STUDIO

Complesso Cenni

| Emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito | kgCO_{2eq} |
|---|---------------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto dei pannelli X-LAM presso un centro di trasformazione | 2668,64 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di montanti e guide in acciaio e lastre in cartongesso presso un centro di riciclaggio | 57,09 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di isolante in lana di roccia, infissi e lastre di vetro e frangisole in alluminio presso rivenditori di materiali da costruzione | 135,22 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di calcestruzzo presso un impianto di frantumazione | 1306,74 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto delle barre di armatura presso fonderia | 590,29 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trasporto di calcestruzzo presso centro di smaltimento | 1054,68 |
| TOTALE | 5812,66 |

TAB. 30 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO DEL QUARTO CASO STUDIO

Aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dall'attività di trasformazione/ trattamento per successivo riutilizzo



Villa GP

| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo | kgCO _{2eq} |
|---|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalle operazioni di piallatura | 34,96 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalle operazioni di rimozione di parti forate | 45,10 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trattamento impregnante | 0,48 |
| TOTALE | 80,55 |

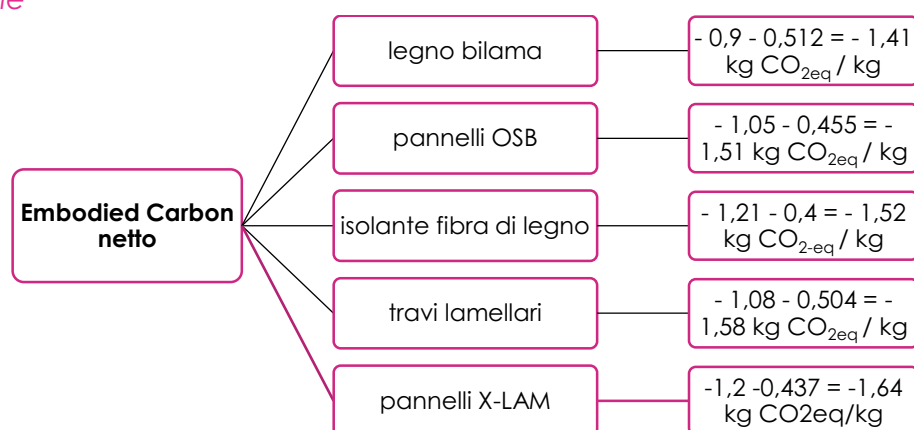
TAB. 31 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALL'ATTIVITA' DI TRASFORMAZIONE PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO DEL TERZO CASO STUDIO

Complesso Cenni

| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dall'attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo | kgCO _{2eq} |
|---|---------------------|
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalle operazioni di piallatura dei pannelli X-LAM | 484,06 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalle operazioni di rimozione di parti forate di pannelli X-LAM | 161,74 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dal trattamento impregnante su pannelli X-LAM | 8,89 |
| Emissioni di CO _{2eq} prodotte dalla frantumazione del calcestruzzo | 8,69 |
| TOTALE | 663,37 |

TAB. 32 EMISSIONI DI CO_{2EQ} PRODOTTE DALL'ATTIVITA' DI TRASFORMAZIONE PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO DEL QUARTO CASO STUDIO

Aliquota di emissioni di CO_{2eq5} quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale



Villa GP

| ELEMENTI IN LEGNO | PESO [kg] | EMBODIED CARBON [kgCO _{2eq} /kg] | EMISSIONI [kgCO _{2eq}] |
|-----------------------------------|-----------|---|----------------------------------|
| Montanti in legno di abete bilama | 322,64 | -1,41 | -455,56 |
| Correnti in legno di abete bilama | 226,20 | -1,41 | -319,39 |
| Pannelli OSB | 969,88 | -1,51 | -1459,67 |
| Isolamento fibra di legno | 0,00 | -1,52 | 0,00 |
| Travi lamellari | 792,31 | -1,58 | -1255,02 |
| | | | -3489,65 |

TAB. 33 EMISSIONI DI CO_{2EQ} STOCCATE DAL MATERIALE DEL TERZO CASO STUDIO

Complesso Cenni

| ELEMENTI IN LEGNO | NUMERO DI ELEMENTI | PESO SFRIDO [kg] | EMBODIED CARBON [kgCO _{2eq} /kg] | EMISSIONI [kgCO _{2eq}] |
|-------------------|--------------------|------------------|---|----------------------------------|
| Pannelli X-LAM | 521 | 79069,75 | -1,64 | -129437,17 |

TAB. 34 EMISSIONI DI CO_{2EQ} STOCCATE DAL MATERIALE DEL QUARTO CASO STUDIO

RISULTATI E DISCUSSIONE

1° fase *Disassemblaggio e Fine vita art.2.4.14 e Demolizione selettiva, recupero e riciclo ai sensi dell'art. 2.6.2*

La prima fase è stata formulata in modo da ottimizzare alcuni passaggi per la presentazione della documentazione CAM necessaria ai fini della partecipazione ad un bando di gara. Questa fase è, dunque, caratterizzata dalla combinazione delle informazioni richieste dagli articoli 2.4.14 e 2.6.2 dei Criteri ambientali minimi (CAM). Il risultato sarà un elenco ragionato di tutti i materiali, componenti edilizi e degli elementi prefabbricati che possono essere in seguito riutilizzati o riciclati, con l'indicazione del relativo peso rispetto al peso totale

dell'edificio; tale elenco è completato da informazioni di carattere quantitativo di tutte le risorse materiche in input ed in output e la loro presunta destinazione giunti a fine vita. La quantità di materiale da destinare ad attività di recupero/riutilizzo è ottenuta dalla percentuale di materiale riutilizzabile, quest'ultima desunta dall'applicazione dell'indice di riutilizzabilità illustrato nel capitolo dello sviluppo della metodologia.

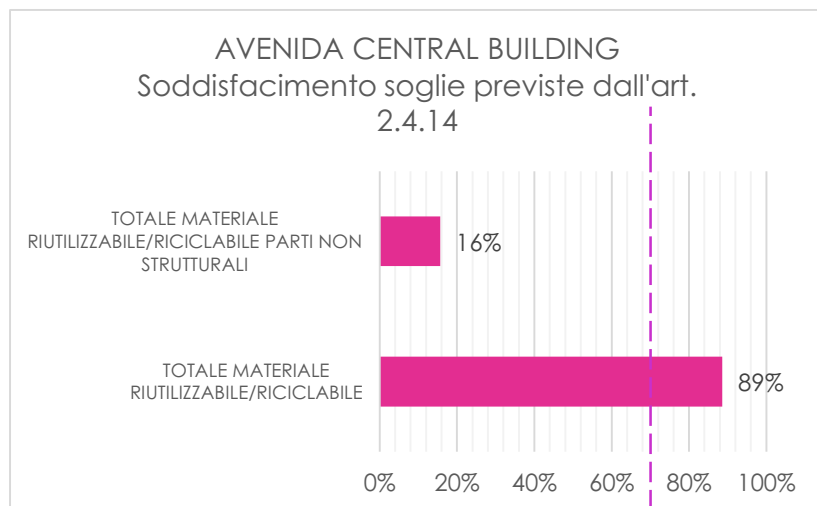


FIG. 43 PERCENTUALE DI MATERIALE STRUTTURALE RIUTILIZZABILE/RICICLABILE DEL PRIMO CASO STUDIO

Dopo l'applicazione del metodo è possibile valutare se l'edificio oggetto di studio, in questo caso il primo caso studio in acciaio, supera o meno la soglia del 70% peso/peso dei componenti edili che possono essere riutilizzati/riciclati a fine vita tramite una demolizione selettiva. Dal grafico si evince che la percentuale di materiale riutilizzabile/riciclabile si attesta all'89%, superando la soglia prevista dai CAM.

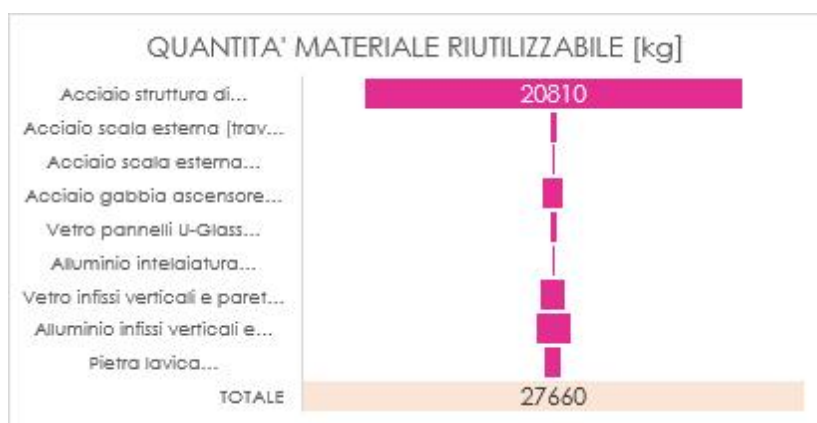


FIG. 44 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI DEL PRIMO CASO STUDIO

Importante contributo alla possibilità di riutilizzo e riciclo dei materiali è stato dato dalla struttura di elevazione in acciaio costituente l'edificio Avenida Central Building e dalla parte in cemento e calcestruzzo dei solai. Infatti, il 75% del materiale riutilizzabile è composto dalle travi, travetti, pilastri della struttura di elevazione; l'80% del materiale riciclabile è costituito da materiale di sfrido di travi, travetti, pilastri della struttura di elevazione; mentre, il 65% del materiale riciclabile è costituito dal calcestruzzo delle chiusure orizzontali inferiori e superiori e delle partizioni interne orizzontali a carattere strutturale.

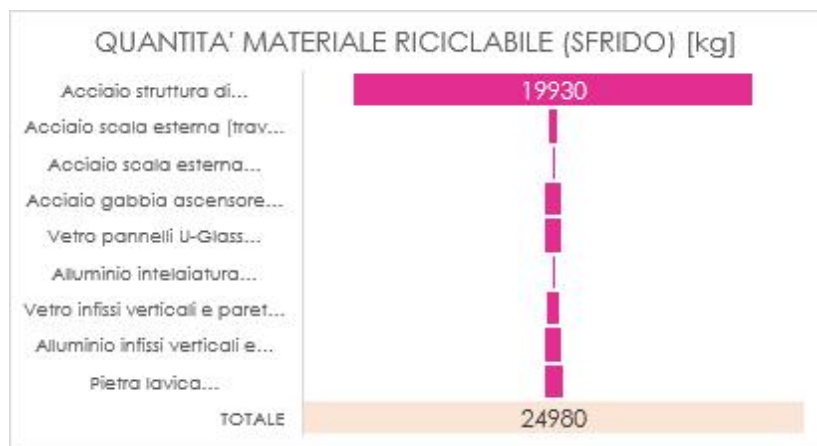


FIG. 45 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI DEL PRIMO CASO STUDIO

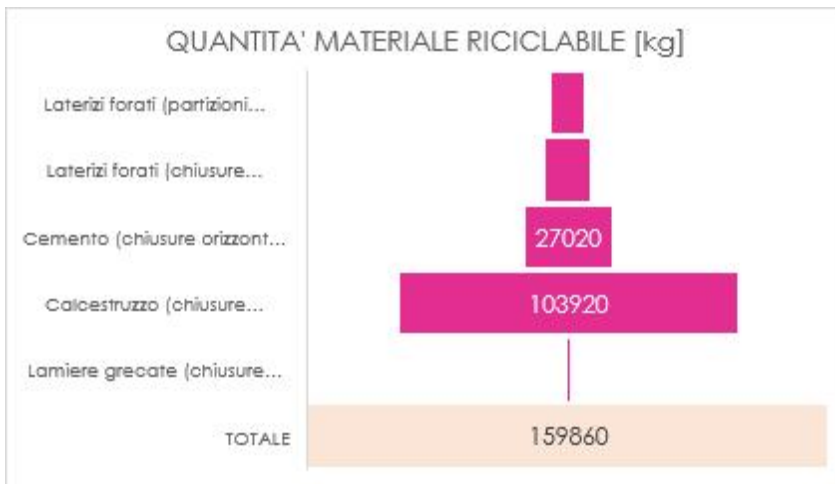


FIG. 46 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI DEL PRIMO CASO STUDIO

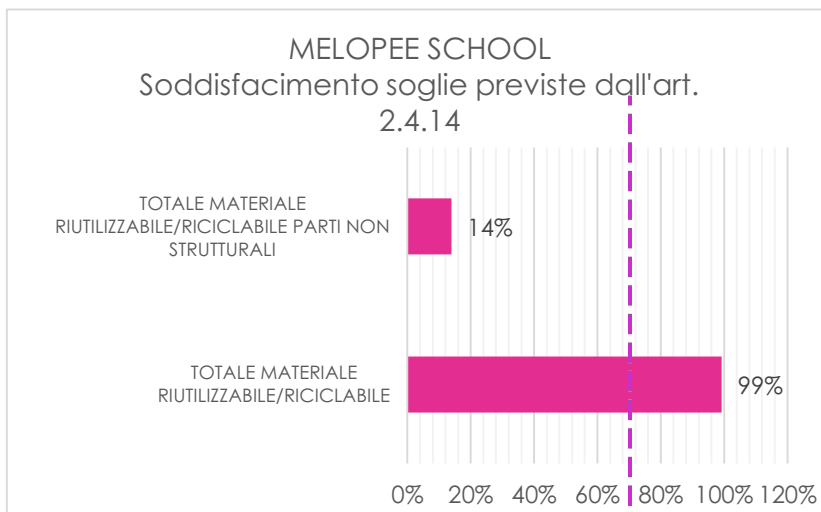


FIG. 47 PERCENTUALE DI MATERIALE STRUTTURALE E NON STRUTTURALE RIUTILIZZABILE/RICICLABILE DEL SECONDO CASO STUDIO

Anche per il secondo caso studio in acciaio, Melopee School, verificiamo il superamento della soglia CAM prevista dall'art. 2.4.14 Disassemblaggio. Ben il 99% dei materiali e delle componenti dell'edificio possono potenzialmente essere riutilizzate/riciclate a fine vita utile dopo una demolizione selettiva degli stessi. Il 14% di questa quantità è costituita da parti non strutturali che possono essere riutilizzate/riciclate (fig. 47).



FIG. 48 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI DEL SECONDO CASO STUDIO

Importante contributo alla possibilità di riutilizzo e riciclo dei materiali è stato dato, anche in questo caso studio in acciaio dalla struttura di elevazione che si attesta al 91% per la parte riutilizzabile e all'81% del materiale riciclabile (fig. 48 – 49), ma anche dalla parte in cemento e calcestruzzo dei solai da riciclare (71%) (fig.50).

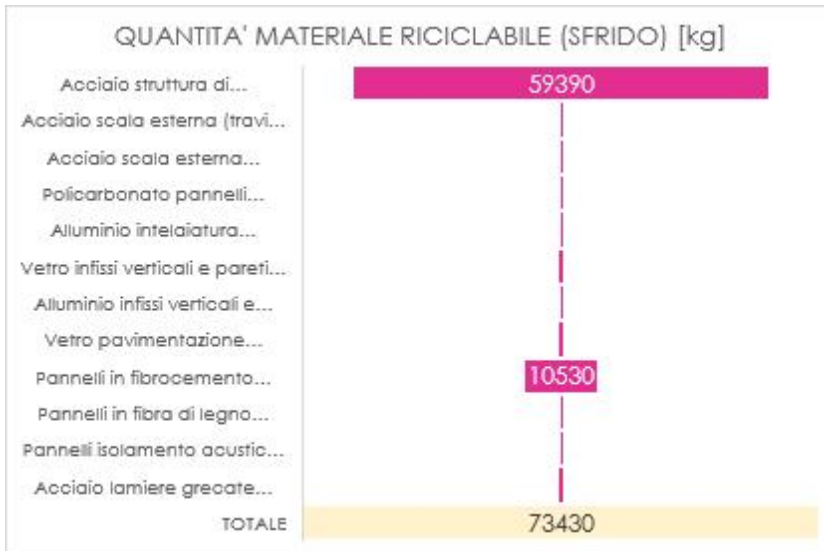


FIG. 49 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI DEL SECONDO CASO STUDIO

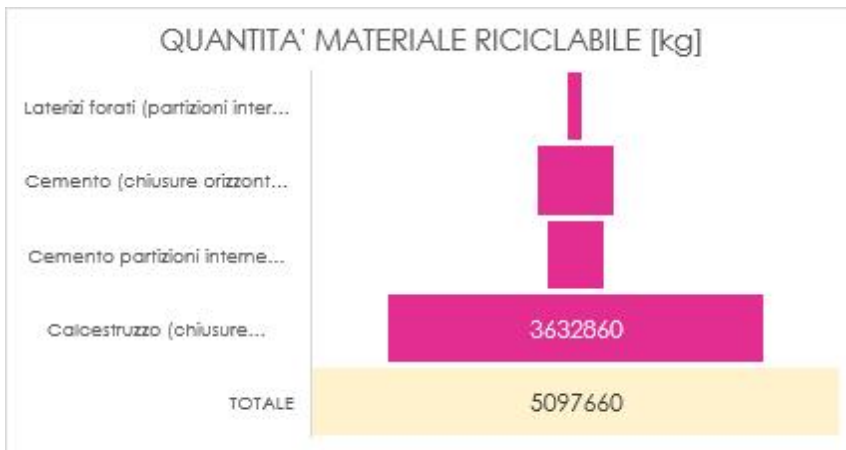


FIG. 50 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI MATERIALI RICICLABILI DEL SECONDO CASO STUDIO

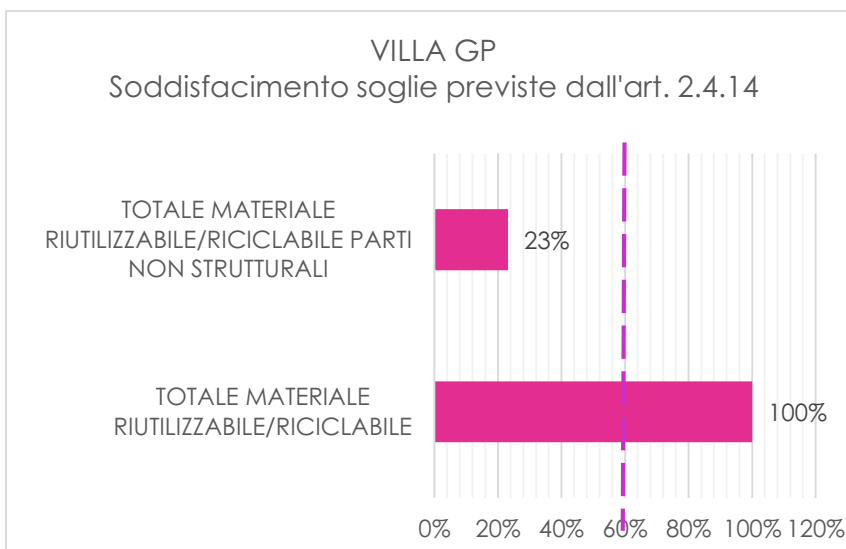


FIG. 51 PERCENTUALE DI MATERIALE STRUTTURALE E NON STRUTTURALE RIUTILIZZABILE/RICICLABILE DEL TERZO CASO STUDIO

Anche per i casi studio in legno verificiamo il superamento delle soglie CAM previste dall'art. 2.4.14 Disassemblaggio. Per Villa GP il potenziale di riutilizzo/riciclo è del 100%, di cui un 23% è costituito da materiale di parti non strutturali (fig. 51).



FIG. 52 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI DEL TERZO CASO STUDIO



FIG. 53 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI AL NETTO DELLO SFRIDO DEL TERZO CASO STUDIO

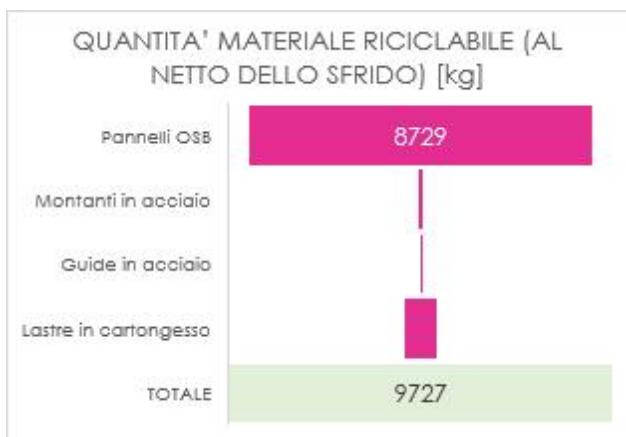


FIG. 54 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI AL NETTO DELLO SFRIDO DEL TERZO CASO STUDIO

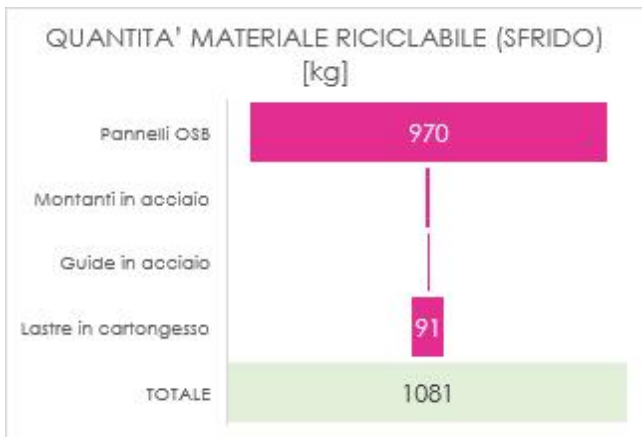


FIG. 55 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI DEL TERZO CASO STUDIO

Il grande potenziale di riutilizzo/recupero nel caso di Villa GP è dovuto soprattutto alla struttura intelaiata in montanti e correnti in abete e le travi lamellari che si attesta ad un totale del 93% sul totale di materiale riutilizzabile (fig. 52). I pannelli OSB incidono di ben il 90% sul totale di materiale riciclabile al netto dello sfrido (fig. 54)

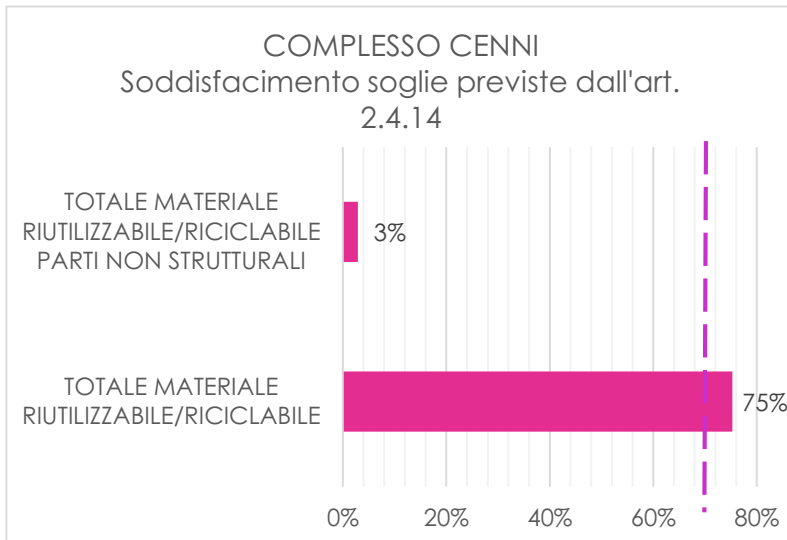


FIG. 56 PERCENTUALE DI MATERIALE STRUTTURALE E NON STRUTTURALE RIUTILIZZABILE/RICICLABILE DEL QUARTO CASO STUDIO

Infine, anche il quarto caso studio (in legno) soddisfa la soglia del 70% del materiale riutilizzabile/riciclabile; tuttavia, i materiali della parte non strutturale che riusciamo a destinare a un secondo ciclo produttivo si attesta soltanto al 3% (fig. 56). Questa percentuale così bassa è dovuta alla natura stessa della tipologia costruttiva in X-LAM, la quale è prevalente nell'intero edificio e classificabile come edilizia di tipo pesante, non lasciando spazio a un grande numero di componenti di altro materiale e natura.

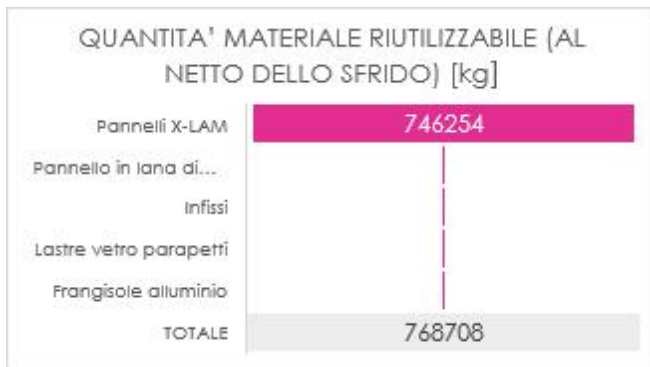


FIG. 57 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI AL NETTO DELLO SFRIDO DEL QUARTO CASO STUDIO



FIG. 58 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RIUTILIZZABILI DEL QUARTO CASO STUDIO

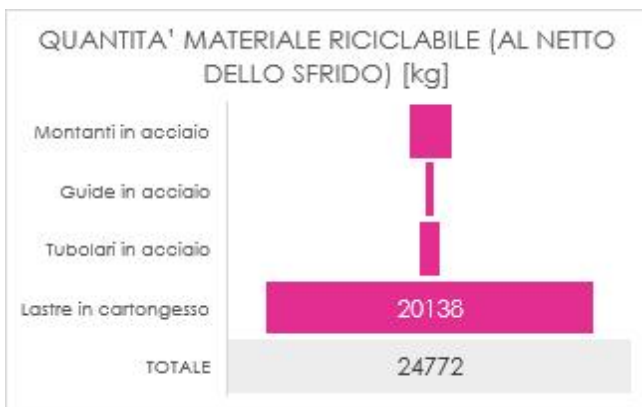


FIG. 59 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI AL NETTO DELLO SFRIDO DEL QUARTO CASO STUDIO

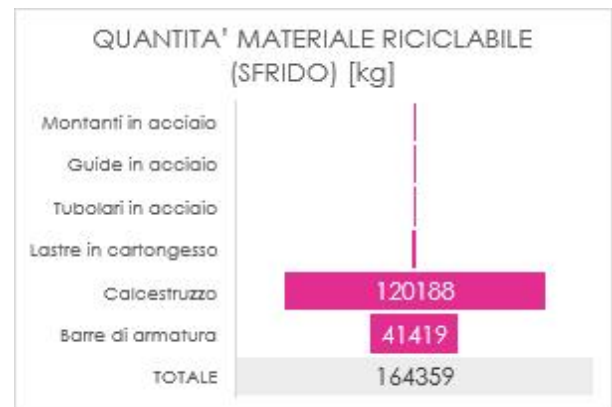


FIG. 60 INCIDENZA SUL TOTALE IN KG DEI VARI MATERIALI RICICLABILI DEL QUARTO CASO STUDIO

Il grande potenziale di riutilizzo/recupero nel caso dell'ultimo caso studio, Complesso Cenni, è dovuto quindi in gran numero ai pannelli X-LAM che si attestano a ben il 97% sul totale di materiale riutilizzabile (fig.57), le lastre di cartongesso delle partizioni interne si attestano all'81% sul totale di materiale riciclabile al netto dello sfrido (fig.59), il calcestruzzo e barre di

armatura dei solai in calcestruzzo (in presenza con solai X-LAM), si attestano rispettivamente al 73% e 25% sul totale di materiale riciclabile (sfrido) (fig. 60).

2° fase LIVELLO DI DISASSEMBLABILITA'

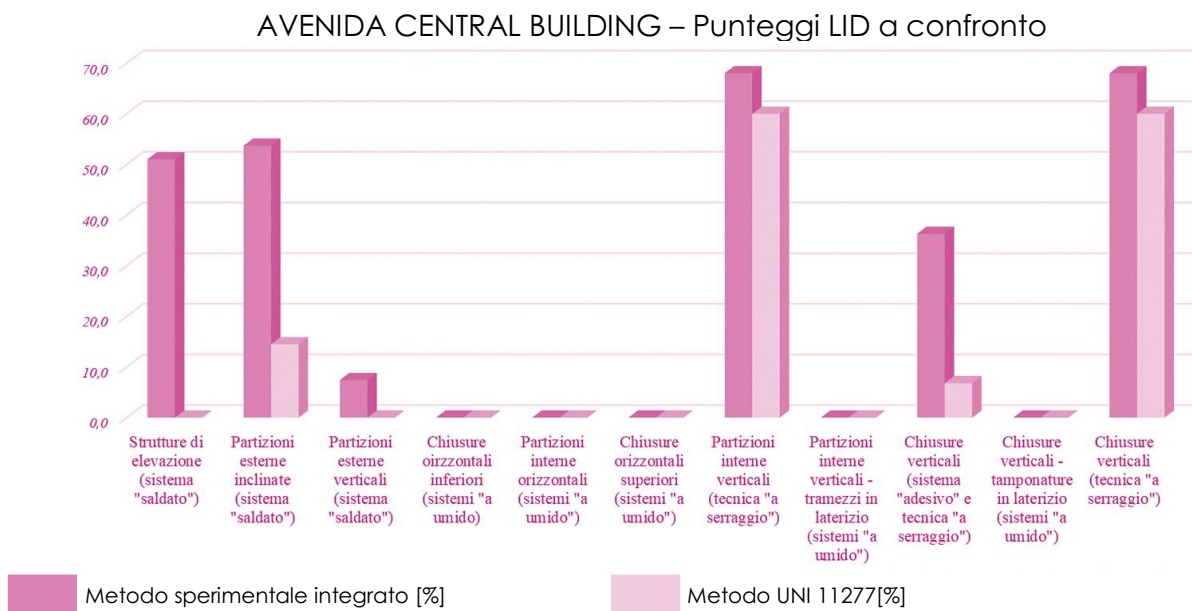


FIG. 61 CONFRONTO TRA I RISULTATI LID DEL METODO UNI E MSI PER IL PRIMO CASO STUDIO

Strutture di elevazione, Partizioni esterne inclinate e partizioni esterne verticali: la prima osservazione interessante da fare è in merito all'applicazione del Metodo UNI a sistemi "saldati", in quanto quest'ultima comporta una fortissima sottostima del recupero degli elementi in acciaio "saldati" della struttura di elevazione, delle partizioni esterne inclinate e delle partizioni esterne verticali.

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da saldature autogene ed eterogene. L'assegnazione di un punteggio nullo alle saldature conferma la volontà della norma di valutare esclusivamente la facilità di separazione di un materiale appartenente ad un elemento tecnico o ad un'unità tecnologica, trascurando così le fasi successive alla fase di smontaggio e che precedono la re-immissione dei materiali nel ciclo produttivo. Le partizioni esterne inclinate, invece, presentano un punteggio leggermente superiore a zero, per la presenza di gradini e pianerottoli in acciaio connessi alle travi sagomate a ginocchio della struttura portante attraverso unioni bullonate, alle quali il Metodo UNI associa un punteggio pari a 3 (60%).

L'applicazione del Metodo sperimentale integrato, invece, consente il superamento dell'approssimazione del metodo UNI, attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità, seppur bassa, per i sistemi saldati (40%), la quale consente di tener conto della possibilità di recuperare elementi in acciaio saldati attraverso tagli al plasma manuali effettuati in loco e successive attività di trasformazione, eseguite presso un centro di trasformazione, con conseguente raggiungimento dei requisiti prestazionali e progettuali. Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo sperimentale integrato sale al 51% e 54% in quanto tiene conto dell'attuale mercato discreto per gli elementi in acciaio provenienti da processi di disassemblaggio e demolizione selettiva, caratterizzati tuttavia da un buon numero di progetti che hanno riutilizzato tali materiali con successo. Le partizioni esterne verticali, invece, presentano un punteggio molto basso per la presenza di pareti in vetro-mattone,

assimilabile ad un sistema "a umido" destinato ad operazioni di riciclo, le quali ricoprono l'87,2% del peso totale dell'unità tecnologica.

Chiusure orizzontali, inferiori e superiori, partizioni interne orizzontali, partizioni interne verticali (tramezzi in laterizio) e chiusure verticali (tamponature in laterizio): l'applicazione sia del Metodo UNI sia del Metodo sperimentale integrato a sistemi "a umido" restituisce un punteggio nullo. Entrambi i metodi associano infatti un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da leganti aerei e idraulici. La presenza di un getto di calcestruzzo per le chiusure e le partizioni orizzontali e la presenza di leganti aerei e idraulici per le partizioni interne verticali (tramezzi in laterizio) e le chiusure verticali (tamponature in laterizio) rendono impossibile qualsiasi attività di riutilizzo.

Partizioni interne verticali (pareti leggere a secco) e chiusure verticali (infissi esterni verticali): l'applicazione del Metodo UNI a sistemi assemblati a secco con tecnica "a serraggio" comporta una sottostima del recupero degli elementi delle partizioni interne verticali (pareti leggere a secco) e delle chiusure verticali (infissi esterni verticali).

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio pari a 3 (60%) a materiali prevalenti caratterizzati da avvitature, leggermente inferiore al punteggio assegnato dal Metodo sperimentale integrato (80%). Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo sperimentale integrato scende al 68%, in quanto tiene conto della natura del materiale prevalente (moduli in vetro) caratterizzato da un'elevata probabilità di danneggiamento durante il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro.

Chiusure verticali (sistema curtain wall): l'applicazione del Metodo UNI a sistemi "adesivi" comporta una fortissima sottostima del recupero degli elementi, assemblati attraverso l'utilizzo di un "adesivo", del sistema curtain wall delle chiusure verticali.

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da adesivi a fusione, a reazione chimica o ad evaporazione. Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo UNI sale al 6,8% per la presenza dell'intelaiatura metallica (sistema di piastre e di profili in alluminio sagomati a freddo, verticali e orizzontali) collegata alla struttura di elevazione attraverso avvitature e rivettature.

L'applicazione del Metodo sperimentale integrato, invece, consente il superamento dell'inefficacia e dell'approssimazione del metodo UNI, attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità, seppur bassa, per i sistemi adesivi (20%), la quale consente di tener conto della possibilità di recuperare, anche in piccole quantità, i pannelli del sistema curtain wall attraverso l'utilizzo di tira-chiodi o utensili manuali. Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo sperimentale integrato sale al 36% per la presenza dell'intelaiatura metallica (sistema di piastre e di profili in alluminio sagomati a freddo, verticali e orizzontali) collegata alla struttura di elevazione attraverso avvitature e rivettature.

MELOPEE SCHOOL- Punteggi LID a confronto

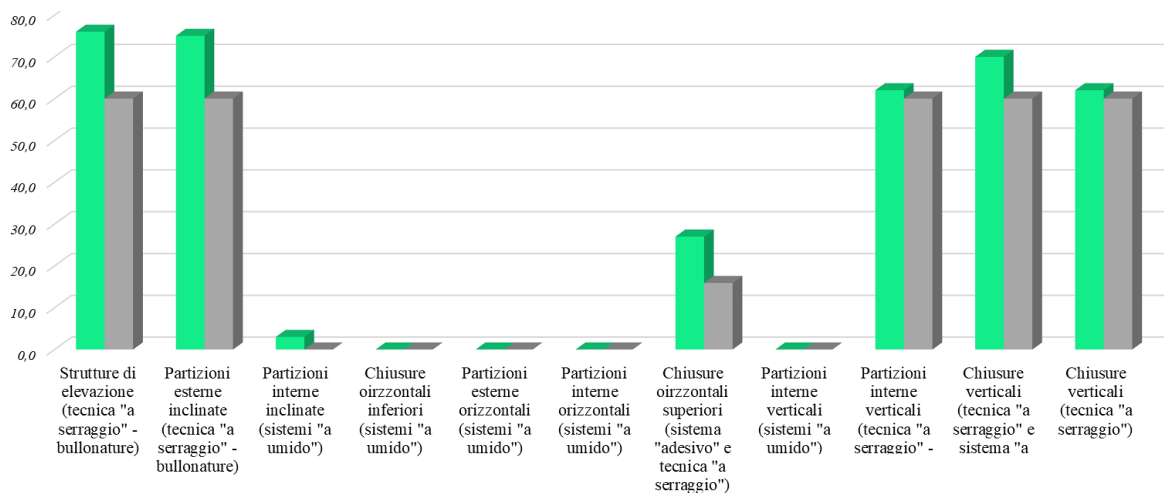


FIG. 62 CONFRONTO TRA I RISULTATI LID DEL METODO UNI E MSI PER IL SECONDO CASO STUDIO

Strutture di elevazione e partizioni esterne inclinate: l'applicazione del Metodo UNI a sistemi "bullonati" comporta una sottostima del recupero degli elementi in acciaio "bullonati" della struttura di elevazione e delle partizioni esterne inclinate.

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio pari a 3 (60%) a materiali prevalenti caratterizzati da bullonature. L'assegnazione di un punteggio pari a 3 (60%) a qualsiasi tipologia di sistema assemblato a secco con tecnica "a serraggio" (bullonature, chiodature, avvitature, rivettature), oltre a trascurare la maggiore facilità di smontaggio e la minor percentuale di danno arrecata al materiale che si ha nel caso di unioni bullonate, comporta un appiattimento dei risultati, i quali restano invariati (60%) anche al variare della tipologia di connessione (bullonature, chiodature, avvitature, rivettature).

L'applicazione del Metodo sperimentale integrato consente il superamento dell'approssimazione del metodo UNI, attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità massima per i sistemi bullonati facilmente accessibili (100%). Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo sperimentale integrato scende al 76%, per la struttura di elevazione, e al 75%, per le partizioni esterne inclinate, in quanto tiene conto della perdita di materiale in seguito al taglio di porzioni di materiale forato, presso centri di trasformazione, e dell'attuale mercato discreto per gli elementi in acciaio provenienti da processi di disassemblaggio e demolizione selettiva, caratterizzati tuttavia da un buon numero di progetti che hanno riutilizzato tali materiali con successo.

Partizioni interne verticali (pareti leggere a secco) e chiusure verticali: l'applicazione del Metodo UNI a sistemi assemblati a secco con "tecnica a serraggio" e sistemi assemblati a secco con tecnica "a incastro" comporta una sottostima del recupero degli elementi in acciaio "avvitati" o muniti di "incastrati a scatto" delle partizioni interne verticali e delle chiusure verticali.

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio pari a 3 (60%) a materiali prevalenti caratterizzati da avvitature o incastrati a scatto. L'assegnazione di un punteggio pari a 3 (60%) a qualsiasi tipologia di sistema assemblato a secco, oltre a trascurare la maggiore facilità di smontaggio e la minor percentuale di danno arrecata al materiale che si ha nel caso di incastrati a scatto, comporta un appiattimento dei risultati, i quali restano invariati (60%) anche al variare della tipologia di connessione (avvitature, incastrati a scatto, bullonature, chiodature, rivettature). Infine, l'assegnazione di un punteggio indipendentemente dalle caratteristiche

del materiale prevalente oggetto della connessione contribuisce ad un ulteriore appiattimento dei risultati, i quali restano invariati anche al variare della natura del materiale (vetro, polycarbonato) e delle sue potenzialità di rivendita.

L'applicazione del Metodo sperimentale integrato consente il superamento dell'approssimazione del metodo UNI, attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità massima per i sistemi assemblati a secco con tecnica "a incastro" (100%). Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo sperimentale integrato scende al 62% per le pareti leggere a secco delle partizioni interne verticali e per gli infissi esterni delle chiusure verticali in quanto tiene conto della natura del materiale prevalente (moduli in vetro) caratterizzato da un'elevata probabilità di danneggiamento durante il trasporto al suolo ed il caricamento su autocarro.

Chiusure orizzontali inferiori, partizioni interne orizzontali, partizioni interne verticali (tramezzi in laterizio e cemento): l'applicazione sia del Metodo UNI sia del Metodo sperimentale integrato a sistemi "a umido" restituisce un punteggio nullo. Entrambi i metodi associano infatti un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da leganti aerei e idraulici. La presenza di un getto di calcestruzzo per le chiusure orizzontali e le partizioni interne orizzontali e la presenza di leganti aerei e idraulici per le partizioni interne verticali (tramezzi in laterizio o in cemento) rendono impossibile qualsiasi attività di riutilizzo. Le partizioni esterne inclinate presentano un punteggio leggermente superiore a zero, per la presenza di una pavimentazione in pannelli in vetro, la quale ricopre solo il 6,76% del peso totale dell'unità tecnologica, assemblati attraverso l'utilizzo di un "adesivo", tecnologia di posa in opera alla quale il Metodo sperimentale integrato associa un punteggio pari al 20%.

Chiusure orizzontali superiori: l'applicazione del Metodo UNI a sistemi assemblati a secco con tecnica "a serraggio" e sistemi "adesivi" comporta una leggera sottostima del recupero degli elementi delle chiusure orizzontali superiori

Il Metodo UNI associa infatti un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da adesivi a fusione, a reazione chimica o ad evaporazione. Il punteggio complessivo assegnato dal Metodo UNI sale al 27% per la presenza dei pannelli in EPS e delle lamiere grecate collegati ad un'orditura metallica sottostante attraverso avvitature e rivettature.

L'applicazione del Metodo sperimentale integrato, invece, consente il superamento dell'inefficacia e dell'approssimazione del metodo UNI attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità, seppur bassa, per i sistemi adesivi (20%), la quale consente di tener conto della possibilità di recuperare, anche in piccole quantità, i pannelli di materiale isolante delle chiusure orizzontali superiori, attraverso però attività di rigenerazione completa data la particolare fragilità dei materiali.

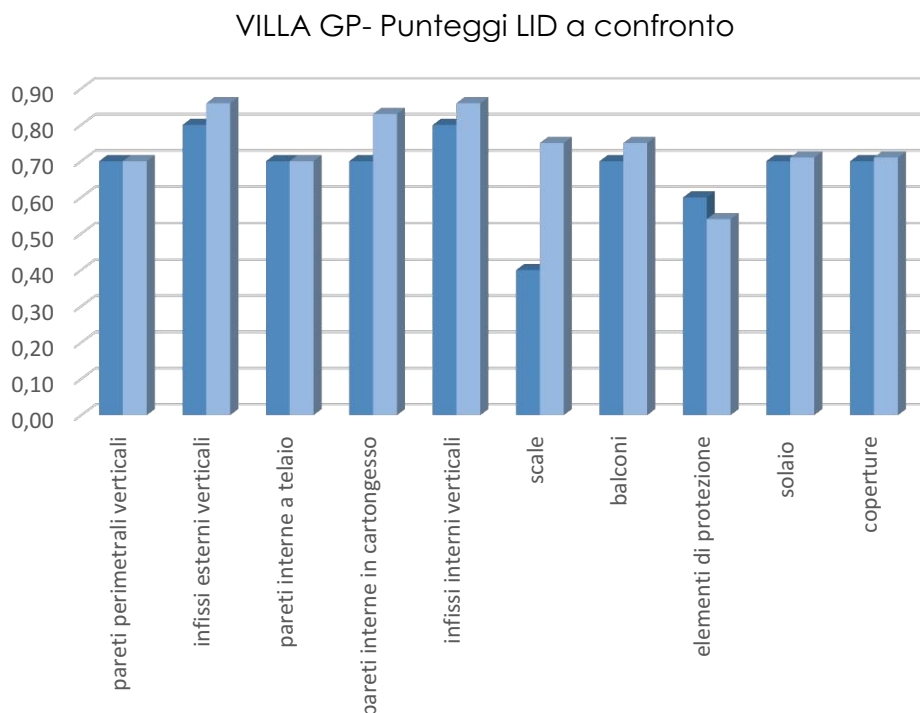


FIG. 63 CONFRONTO TRA I RISULTATI LID DEL METODO UNI E MSI PER IL TERZO CASO STUDIO

Dal grafico (fig. 63) si evincono tre situazioni differenti: il punteggio LID ottenuto con il metodo sperimentale integrato risulta essere maggiore del punteggio ottenuto con il metodo UNI, minore oppure i due punteggi risultano essere pressappoco uguali.

Gli elementi di protezione sono l'unico elemento tecnico con punteggio LID ottenuto con il metodo UNI superiore rispetto al punteggio LID ottenuto con il metodo sperimentale integrato. Nel caso studio di Villa GP gli elementi di protezione, ovvero i parapetti, sono costituiti da lastre di vetro; il metodo UNI, basandosi unicamente sulla tecnologia di posa in opera, non considera la fragilità degli elementi; quindi, la possibilità che questi possano rompersi durante le operazioni di disassemblaggio. Tale caratteristica, di cui si è invece tenuto conto nel metodo sperimentale integrato, ha ridotto il punteggio LID.

Le scale, al contrario, presentano un punteggio nettamente superiore con l'utilizzo del metodo sperimentale integrato. Sono realizzate con un'ossatura portante in acciaio, composta da una piastra bullonata alla parete e da tondini in acciaio saldati alla piastra, e sono completate con pedate in legno di noce incastrate nei tondini. Il metodo UNI assegna 0,6 alla piastra in acciaio bullonata, 0 ai tondini in acciaio saldati e ancora 0,6 alle pedate in noce incastrate, ottenendo una sottostima con punteggio finale di 0,4. Il metodo sperimentale integrato, invece, assegna 0,75 alla piastra, 0,25 ai tondini e 1 alle pedate, inoltre considera che il trasporto di tali elementi avviene manualmente quindi con basso rischio di danneggiamento (punteggio pari ad 1) e che sono necessarie modifiche in officina poco invasive (punteggio pari ad 1), ottenendo un punteggio finale di 0,75. Le pareti perimetrali e le pareti interne a telaio presentano il medesimo punteggio con entrambi i metodi, mentre gli altri elementi tecnici, ovvero pareti interne in cartongesso, infissi interni ed esterni verticali, balconi, solai e coperture, presentano punteggi comparabili.

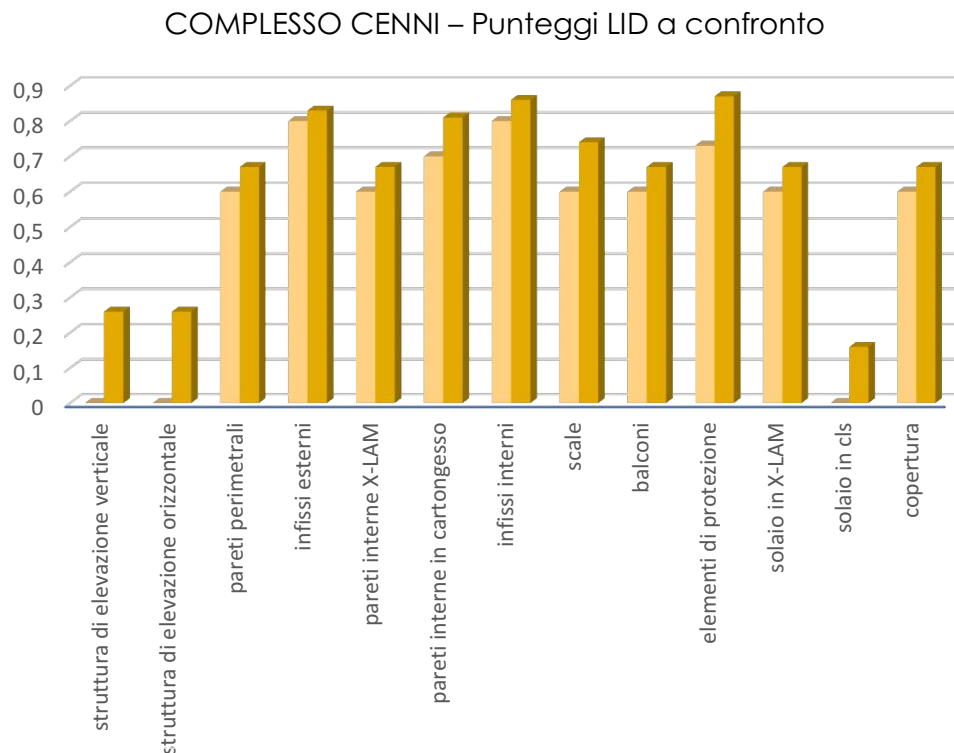


FIG. 64 CONFRONTO TRA I RISULTATI LID DEL METODO UNI E MSI PER IL QUARTO CASO STUDIO

Nel caso studio di Complesso Cenni tutti gli elementi tecnici hanno ottenuto un punteggio maggiore con l'utilizzo del metodo sperimentale integrato (fig. 64).

Ciò che si nota maggiormente è che la struttura di elevazioni orizzontale e verticale in cemento armato e il solaio in calcestruzzo, ovvero i leganti idraulici e aerei, presentano un punteggio pari a 0 con il metodo UNI, mentre assumono un valore pari 0,26 se si utilizza il metodo sperimentale integrato il quale, oltre al parametro Tecnologia di posa in opera, considera anche i parametri Operazioni di movimentazione e trasporto e Modifiche in officina. Per questi elementi sono quindi possibili operazioni di riciclo "down-cycling" in quanto il calcestruzzo da materiale strutturale "scende di livello" trasformandosi in aggregato.

Gli altri elementi tecnici, ovvero pareti perimetrali e pareti interne in X-LAM, pareti interne in cartongesso, infissi interni ed esterni, scale, balconi, elementi di protezione e coperture in X-LAM, sono caratterizzati da punteggi LID calcolati con il metodo sperimentale integrale di circa il 10% superiori rispetto ai punteggi LID calcolati con il metodo UNI.

3° fase STIMA DELLE EMISSIONI DI CO_{2eq}

Di seguito sono riportati, per tutti i casi studio, i risultati ottenuti per ciascuna delle quattro aliquote (Fig. 65 - 66 - 67 - 68), attraverso l'incidenza di ciascuna sul totale delle emissioni di CO_{2eq} generate dal processo di disassemblaggio e demolizione selettiva (Tab.35).

| | |
|--|---------------------------|
| AVENIDA CENTRAL BUILDING | kgCO₂eq |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla rimozione delle connessioni e dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | 1464,1 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | 43450 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito | 2178 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₄ prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo | 5920 |
| TOTALE | 53012,1 |
| MELOPEE SCHOOL | kgCO₂eq |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla rimozione delle connessioni e dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | 19429,1 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | 224087 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito | 27756 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₄ prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo | 51329 |
| TOTALE | 322601,1 |
| VILLA GP | kgCO₂eq |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla rimozione delle connessioni e dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | 64,12 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | 1272,96 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito | 989,15 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₄ prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo | 80,55 |
| TOTALE | 2406,78 |
| <i>Emissioni di CO₂eq₅ quale credito compensativo per stoccaggio del legno</i> | -3489,65 |
| TOTALE | -1082,87 |
| COMPLESSO CENNI | kgCO₂eq |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla rimozione delle connessioni e dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | 3292,76 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione | 117112,27 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito | 5812,66 |
| Emissioni di CO ₂ eq ₄ prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo | 663,37 |
| TOTALE | 126881,06 |
| <i>Emissioni di CO₂eq₅ quale credito compensativo per stoccaggio del legno</i> | -129437,2 |
| TOTALE | -2556,11 |

TAB. 35 RISULTATI DELLE QUATTRO ALIQUOTE E I TOTALI DELLE EMISSIONI PRODOTTE IN FASE DI DEMOLIZIONE DEI QUATTRO CASI STUDIO

Emissioni percentuali per la demolizione selettiva a fine vita di AVENIDA CENTRAL BUILDING

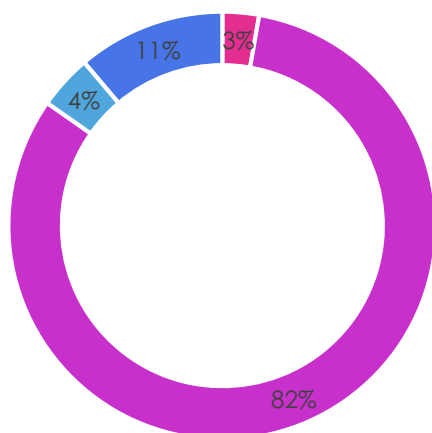


FIG. 65 DIAGRAMMA DELLE PERCENTUALI DI EMISSIONI PER LA DEMOLIZIONE DEL PRIMO CASO STUDIO

Emissioni percentuali per la demolizione selettiva a fine vita di MELOPEE SCHOOL

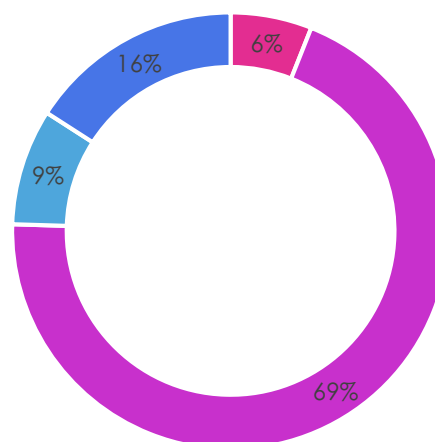


FIG. 66 DIAGRAMMA DELLE PERCENTUALI DI EMISSIONI PER LA DEMOLIZIONE DEL SECONDO CASO STUDIO

Emissioni percentuali per la demolizione selettiva a fine vita di VILLA GP

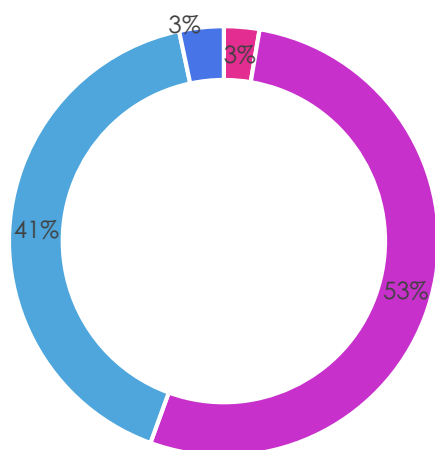


FIG. 67 DIAGRAMMA DELLE PERCENTUALI DI EMISSIONI PER LA DEMOLIZIONE DEL TERZO CASO STUDIO

Emissioni percentuali per la demolizione selettiva a fine vita di COMPLESSO CENNI

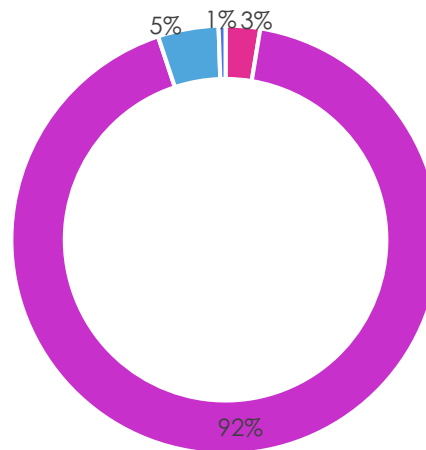


FIG. 68 DIAGRAMMA DELLE PERCENTUALI DI EMISSIONI PER LA DEMOLIZIONE DEL QUARTO CASO STUDIO

- Emissioni di CO2eq prodotte dalla rimozione delle connessioni e dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro
- Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido conseguente alle operazioni di demolizione
- Emissioni di CO2eq3 prodotte dal trasporto fuori dal sito
- Emissioni di CO2eq4 prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo

Il dato che risulta immediatamente significativo è la percentuale molto alta per tutti e quattro di casi studio dell'aliquota di emissioni di CO₂eq prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione; tale dato si attesta ad una percentuale dell'82% per il primo caso studio, al 69% per il secondo caso studio, al 53% per il terzo caso studio e, infine, ben al 92% per il quarto caso studio.

Piuttosto significativa risulta anche essere la percentuale relativa all'aliquota delle emissioni di CO₂eq prodotte dal trasporto fuori dal sito del caso studio in legno di Villa GP.

Dall'analisi dei dati parziali è possibile effettuare una serie di rilevanti considerazioni.

| CO ₂ eq1 kg | AVENIDA CENTRAL BUILDING | MELOPEE SCHOOL | VILLA GP | COMPLESSO CENNI |
|--|--------------------------------|-------------------|--------------|--------------------|
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla rimozione delle connessioni (bullonature, avvitature, saldature) | 28 | 1 | 16 | 2425 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dalla demolizione di solai in clacestruzzo, pareti in laterizio e/o pareti in cemento | 579 | 16456 | | 71 |
| Emissioni di CO ₂ eq prodotte dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro | 854 | 2974 | 48 | 797 |
| TOTALI | 1464,1 | 19429,1 | 64,12 | 3292,76 |

TAB. 36 TABELLA RIASSUNTIVA DEI QUATTRO CASI STUDI RELATIVA ALLA PRIMA ALIQUOTA DI EMISSIONI

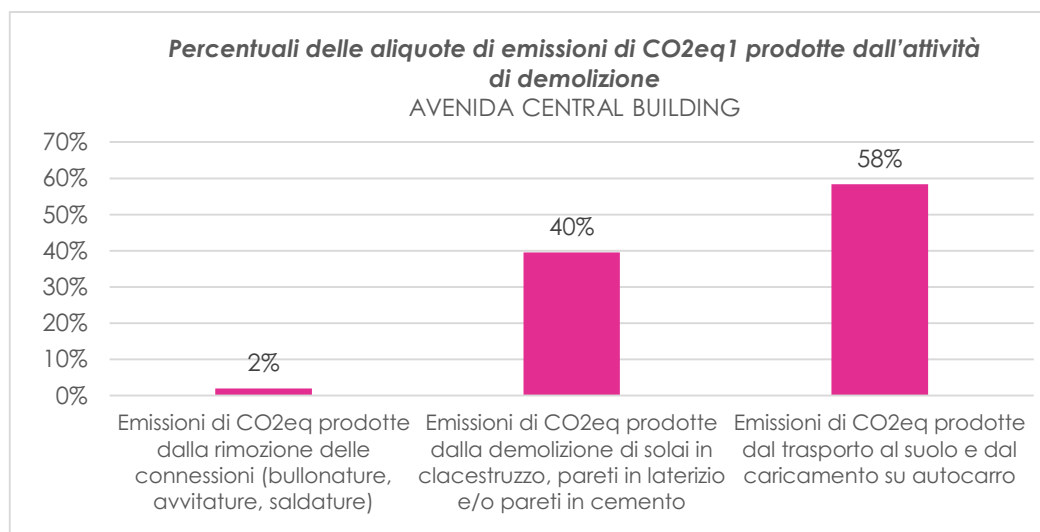


FIG. 69 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ1 PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE – PRIMO CASO STUDIO

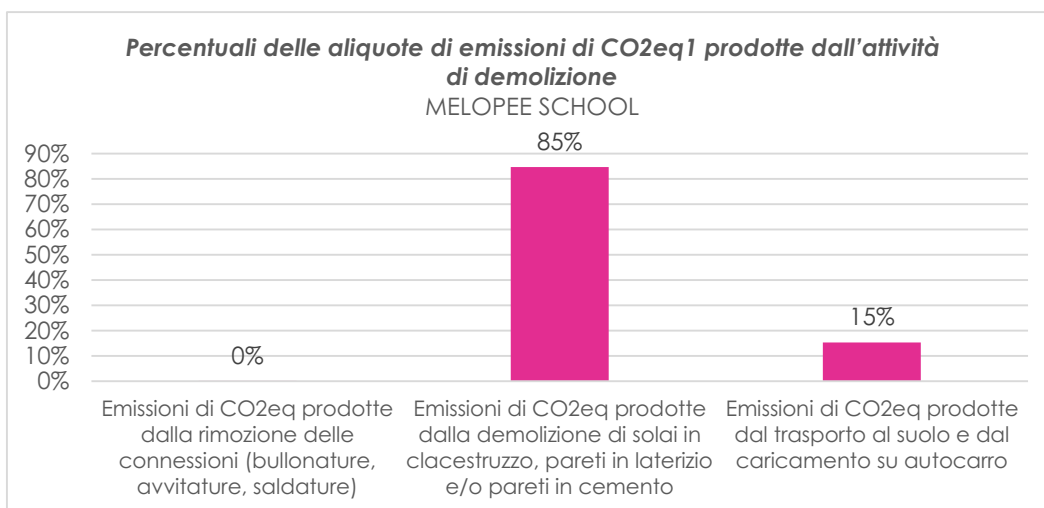


FIG. 70 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ1 PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE – SECONDO CASO STUDIO

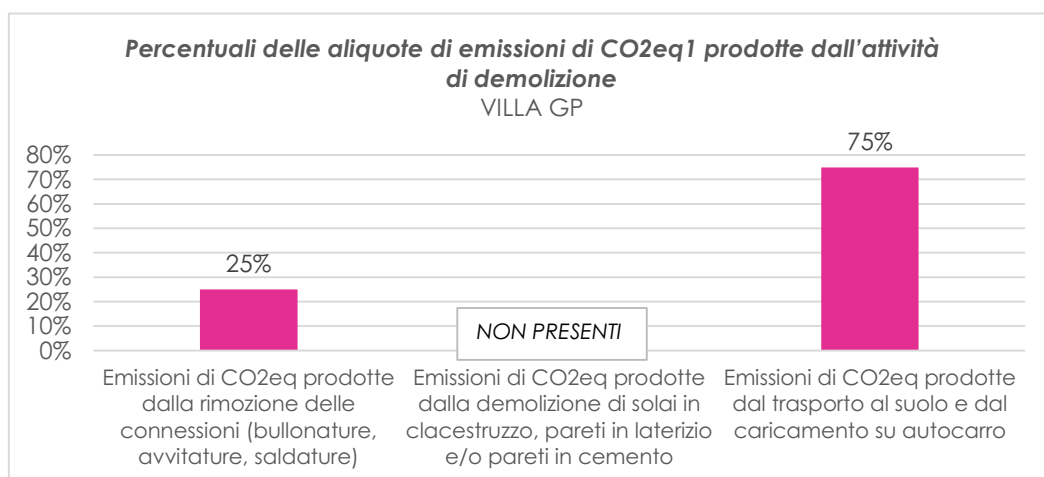


FIG. 71 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ1 PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE – TERZO CASO STUDIO

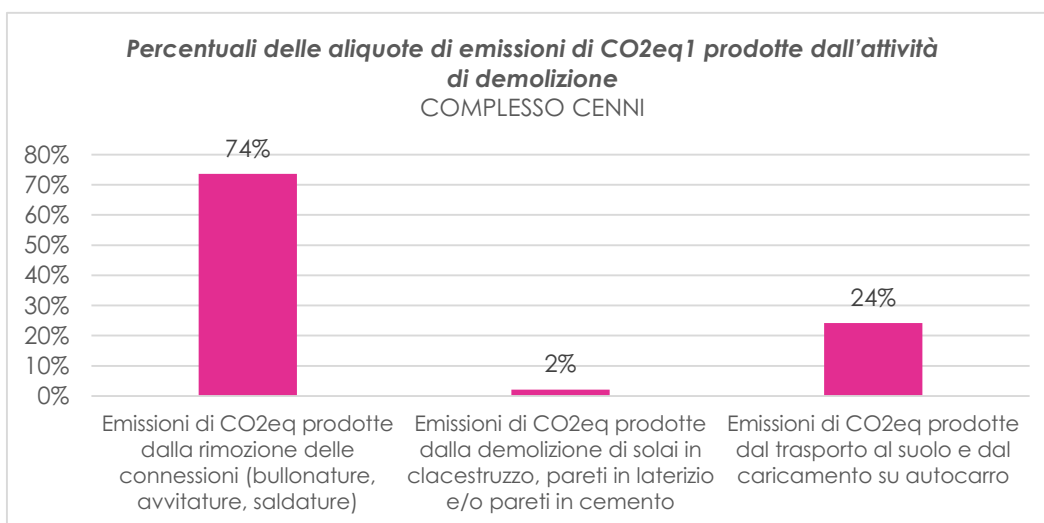


FIG. 72 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ1 PRODOTTE DALLE ATTIVITA' DI DEMOLIZIONE – QUARTO CASO STUDIO

Per il caso studio Avenida Central Building, l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in vetro-mattoni risulta essere pari al 40% (fig. 69). Essa rappresenta la fonte secondaria di emissioni per l'aliquota prodotta dall'attività di demolizione. Discorso opposto vale invece per il caso studio Melopee school, per il quale l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in cemento sale all'85% (fig. 70). Essa rappresenta, infatti, la fonte principale di emissioni per l'aliquota prodotta dall'attività di demolizione. La notevole differenza tra le emissioni generate dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in vetro-mattoni o cemento è evidenziata dalla quantità di CO_{2eq} generata per m² di superficie demolita. Per il caso studio Avenida Central Building, grazie alla presenza di solai compositi con lamiera grecata e caldana in calcestruzzo, caratterizzati da spessori limitati (20 cm), l'attività di demolizione genera 1,42 kg di CO_{2eq} per m² di superficie demolita.

Per il caso studio Melopee school, invece, a causa della presenza di solai tradizionali in calcestruzzo gettati in opera, caratterizzati da spessori elevati (50 cm), l'attività di demolizione genera 2,16 kg di CO_{2eq} per m² di superficie demolita, ovvero 1,52 volte superiore alle emissioni generate dall'attività di demolizione per il caso studio Avenida Central Building. I risultati mostrano il contributo di solai compositi con lamiera grecata e caldana in Cls a ridurre, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva, le emissioni di CO_{2eq} prodotte dall'attività di demolizione. I solai compositi con lamiera grecata e caldana in Cls, in grado di sfruttare al meglio le prestazioni sia dell'acciaio che del calcestruzzo, consentono una riduzione delle sezioni trasversali [rif] ed una riduzione dei volumi di materiale da demolire, con conseguente riduzione dei tempi di funzionamento e del consumo di carburante dei macchinari utilizzati per le attività di demolizione. L'altezza di un solaio composito, infatti, varia in genere dai 100 ai 150 mm, con luci da 2,50 a 3,00 m.

Discorso opposto vale, invece, per i solai tradizionali in Cls gettati in opera i quali contribuiscono ad aumentare, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva, le emissioni di CO_{2eq} prodotte dall'attività di demolizione. I solai tradizionali in Cls gettati in opera sono caratterizzati generalmente da altezze superiori ai 160 mm. Per il caso studio Melopee school i solai tradizionali in Cls gettati in opera, caratterizzati da blocchi di polistirene espanso sinterizzato (EPS) a sostituzione delle tradizionali pignatte in laterizio, presentano un'altezza massima pari a 460 mm, comportando un aumento notevole dei volumi di materiale da demolire, con conseguente aumento dei tempi di funzionamento e del consumo di carburante dei macchinari utilizzati per le attività di demolizione.

Per i casi studio in legno, non essendo presenti o solo parzialmente elementi in calcestruzzo, laterizio o cemento, questa aliquota è nulla o non significativa ai fini del bilancio finale.

Per il caso di Villa GP, caso studio in legno, l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo risulta essere pari al 72% e rappresenta la fonte primaria di emissioni per l'aliquota prodotta dall'attività di demolizione, generando 46,05 kg di CO_{2eq}. La stessa aliquota rappresenta il 24% delle emissioni totali per il caso del Complesso di Via Cenni (fig. 71 - 72).

L'aliquota prodotta dalla rimozione delle connessioni risulta essere molto alta soltanto per il caso del Complesso di Via Cenni, pari al 74%, producendo 2425,05 kg di CO_{2eq}. In tal senso si posiziona al secondo posto Villa GP con il 25% di emissioni.

Analizzando le emissioni di CO_{2eq} generate da 1 m³ di volume viene fatta chiarezza sulla notevole differenza dei risultati. I due casi studio presentano valori comparabili in merito alle emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo per m³, sono infatti pari 0,059 kg CO_{2eq}/m³ per Villa GP e 0,065 kg CO_{2eq}/m³ per il Complesso di Via Cenni. Ciò che provoca una tale discrepanza tra i risultati è invece l'emissione prodotta dall'attività di demolizione: 0,0203 kg CO_{2eq}/m³ nel caso studio di Villa GP e 0,199 kg CO_{2eq}/m³ nel caso studio del Complesso di Via Cenni, circa 10 volte il risultato precedente.

| CO2eq2 kg | AVENIDA CENTRAL BUILDING | MELOPEE SCHOOL | VILLA GP | COMPLESSO CENNI |
|---|---|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli elementi in acciaio della struttura di elevazione, della scala esterna, della gabbia ascensore, delle lamiere | 33248 | | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido della pavimentazione in pietra lavica | 1316 | | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido dei pannelli U-glass chiusure verticali | 1631 | | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli infissi verticali e delle pareti leggere a secco | 7255 | | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli elementi in acciaio della struttura di elevazione, della scala esterna, della gabbia ascensore, delle lamiere | | 104594 | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido della pavimentazione in vetro antiscivolo | | 10160 | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido dei pannelli in policarbonato chiusure verticali | | 16108 | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido dei pannelli di materiale termo-isolante | | 41619 | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli infissi verticali e delle pareti leggere a secco | | 51607 | | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti perimetrali a telaio | | | 512 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti interne a telaio | | | 32 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti interne in cartongesso | | | 64 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido dei solai | | | 252 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido della copertura | | | 310 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli infissi, dei balconi e delle scale | | | 102 | |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti perimetrali in X-LAM | | | | 10110 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti interne in X-LAM | | | | 6205 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido delle pareti interne in cartongesso | | | | 1427 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido dei solai | | | | 25606 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido della copertura | | | | 870 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido degli infissi, dei balconi e delle scale | | | | 4961 |
| Emissioni di CO2eq prodotte dallo sfido della struttura di elevazione in c.a. | | | | 67933 |
| TOTALI | 43450 | 224088 | 1272 | 117112 |

TAB. 37 TABELLA RIASSUNTIVA DEI QUATTRO CASI STUDI RELATIVA ALLA SECONDA ALIQUOTA DI EMISSIONI

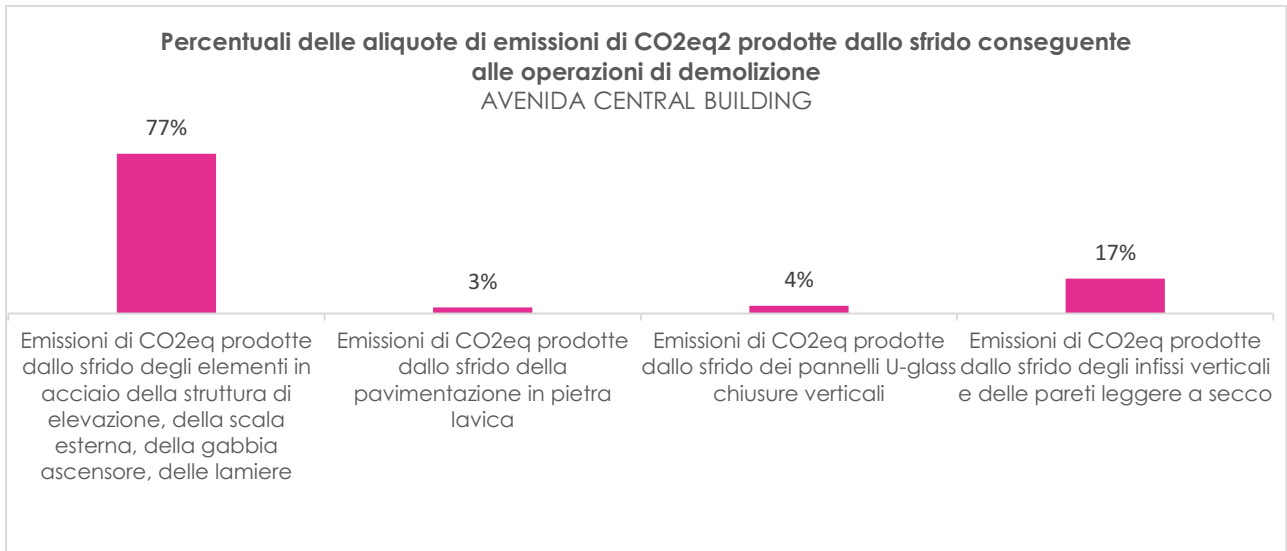


FIG. 73 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₂ PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE – PRIMO CASO STUDIO

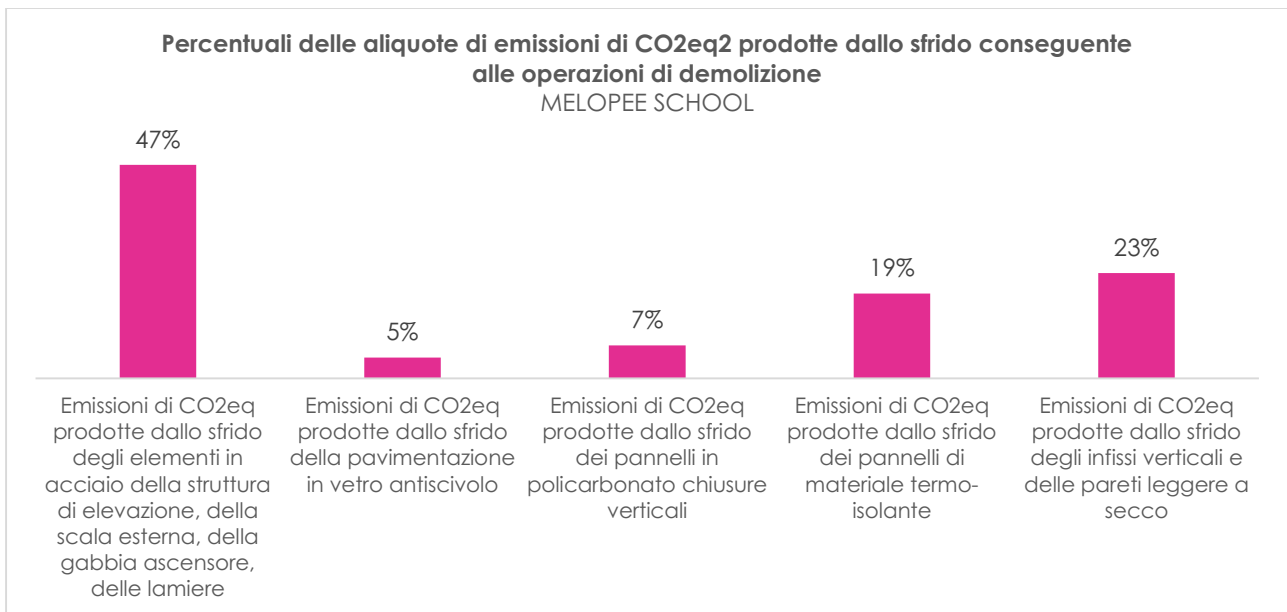


FIG. 74 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₂ PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE – SECONDO CASO STUDIO

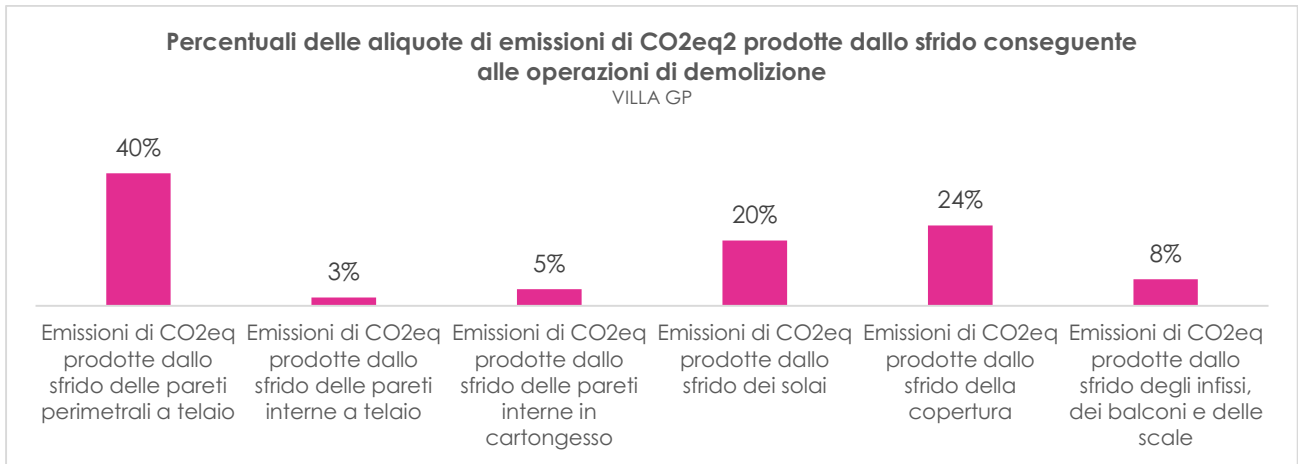


FIG. 75 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ2 PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE – TERZO CASO STUDIO

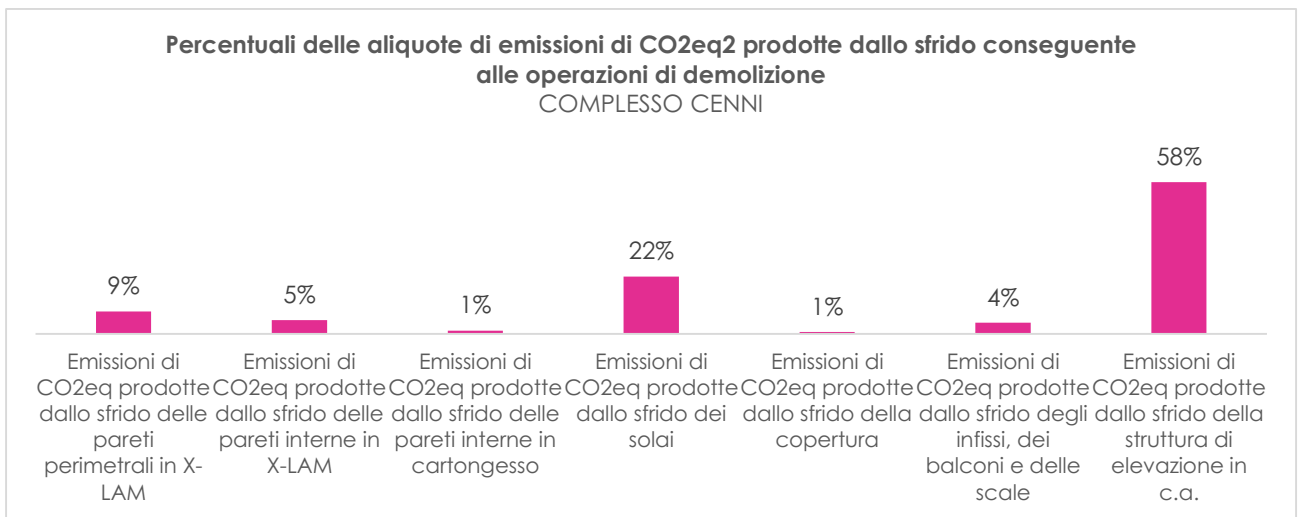


FIG. 76 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ2 PRODOTTE DALLO SFRIDO CONSEGUENTE ALLE OPERAZIONI DI DEMOLIZIONE – QUARTO CASO STUDIO

Per il caso studio Avenida Central Building l'incidenza delle emissioni di CO₂eq prodotte dallo sfrido degli elementi in acciaio (struttura di elevazione, scala esterna, gabbia ascensore) risulta essere pari al 77% (fig. 73). Essa rappresenta, infatti, la fonte principale di emissioni per l'aliquote prodotta dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione.

Stesso discorso vale per il caso studio Melopee school per il quale, però, l'incidenza delle emissioni di CO₂eq prodotte dallo sfrido degli elementi in acciaio (struttura di elevazione, scala esterna, lamiere grecate) scende al 47% (fig. 74).

La notevole differenza tra le emissioni generate dallo sfrido degli elementi in acciaio è evidenziata dalla percentuale di acciaio riciclabile, rispetto a quella riutilizzabile, e dalla conseguente quantità di CO₂eq generata dallo sfrido per kg di materiale potenzialmente riutilizzabile. Per il caso studio Avenida Central Building, la prevalenza di unioni saldate rispetto alle unioni bullonate ha comportato una percentuale di acciaio riutilizzabile pari al 51%, leggermente superiore alla percentuale di acciaio riciclabile (sfrido) pari al 49%.

Per il caso studio Melopee school, la presenza di unioni unicamente bullonate ha comportato una percentuale di acciaio riutilizzabile pari al 75%, di gran lunga superiore alla percentuale di acciaio riciclabile (sfrido) pari al 25%. I risultati mostrano il contributo delle unioni bullonate ad aumentare, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di sistemi tecnologici "a secco" in acciaio, la quantità di acciaio riutilizzabile, a discapito della quantità di acciaio riciclabile e delle conseguenti emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido. L'utilizzo esclusivo di avvitatori ad impulsi durante la fase di smontaggio consente di arrecare il minor danno possibile al materiale ed ottenere elevate percentuali di materiale riutilizzabile.

Discorso opposto vale, invece, per le unioni saldate, le quali contribuiscono ad aumentare, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di sistemi tecnologici "a secco" in acciaio, la quantità di acciaio riciclabile e le conseguenti emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido. L'utilizzo di tagli al plasma manuali, oltre ad arrecare percentuali di danno elevate al materiale, necessita di un maggior numero di operazioni da eseguire presso un centro di trasformazione con conseguente ulteriore perdita di materiale. L'esecuzione di un singolo taglio al plasma manuale comporta, infatti, la regolazione di eventuali tagli convergenti o divergenti, la regolazione di eventuali superfici di taglio con cavità, con profilo ondulato, inclinate, con bordo inferiore arrotondato o con gradino, la rimozione di materiale eventualmente non asportato durante il taglio e la rimozione di eventuali striature ed erosioni profonde.

La tecnologia di posa in opera risulta incidere anche sull'aliquota di emissioni di CO_{2eq1} prodotte dall'attività di demolizione, in particolare sulle emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo e dal caricamento su autoarticolato degli elementi della struttura di elevazione. Quest'ultima, per entrambi i casi studio, rappresenta la fonte principale di emissioni per l'aliquota prodotta dal trasporto al suolo e dal caricamento su autocarro o su autoarticolato di elementi o gruppi di elementi (68% per il caso studio Avenida Central Building, 58% per il caso studio Melopee school).

I risultati mostrano il contributo delle unioni bullonate a ridurre, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di sistemi tecnologici "a secco" in acciaio, le emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo degli elementi della struttura di elevazione. La rimozione di un singolo bullone richiedendo pochi secondi (circa 3 s) consente all'apparecchio di sollevamento di restare agganciato all'elemento da trasportare al suolo, in attesa dello svincolamento dell'elemento, per tempi brevi (circa 70 s), riducendo così il consumo di carburante e le conseguenti emissioni di CO_{2eq}.

Discorso opposto vale invece per le unioni saldate, le quali contribuiscono ad aumentare, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di sistemi tecnologici "a secco" in acciaio, le emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto al suolo degli elementi della struttura di elevazione. Il taglio al plasma manuale dell'estremità di una trave richiedendo un maggior numero di secondi (dai 30 ai 110 s, in funzione della sezione dell'elemento), obbliga all'apparecchio di sollevamento di restare agganciato all'elemento da trasportare al suolo, in attesa del completamento del taglio delle estremità dell'elemento, per tempi lunghi (dai 60 ai 220 s, in funzione della sezione dell'elemento), aumentando così il consumo di carburante e le conseguenti emissioni di CO_{2eq}.

Dai grafici dei casi studio in legno (fig. 75 - 76), si evince che la voce maggiormente incidente è quella relativa allo sfrido delle pareti perimetrali a telaio (40%) per villa GP, generando 511,84 kg CO_{2eq}, mentre quella meno incidente è relativa allo sfrido delle pareti interne a telaio (3%). Il caso studio del Complesso di Via Cenni presenta risultati differenti: le emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido della struttura di elevazione in cemento armato rappresenta l'aliquota maggiore (58%) in quanto il 100% del materiale costituisce sfrido, mentre

| CO₂eq3 kg | AVENIDA CENTRAL BUILDING |
|--|---|
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di elementi della struttura di elevazione | 594 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di piastrelle in pietra lavica | 68 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto dei pannelli U-glass e dell'intelaiatura metallica | 68 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di infissi e pareti leggere a secco | 135 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di laterizi forati | 203 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di intonaco | 135 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di cemento, calcestruzzo e lamiere grecate | 811 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di membrane impermeabilizzanti | 29 |
| Emissioni di CO ₂ e prodotte dal trasporto di vetromattone | 135 |
| TOTALE | 2178 |

TAB. 38 TABELLA RELATIVA ALLA TERZA ALIQUOTA DI EMISSIONI DEL PRIMO CASO STUDIO

CO₂eq prodotte dal trasporto di isolante in lana di roccia, infissi, lastre di vetro e frangisole in alluminio nel caso studio Complesso Cenni 2%) (fig. 77 - 78 - 79 - 80).

l'aliquota minore è rappresentata dallo sfrido della copertura (1%) che genera 869,86 kg CO₂eq.

Per quanto riguarda l'incidenza delle emissioni di CO₂eq prodotte dal trasporto fuori dal sito, gli elementi della struttura portante in legno, ovvero montanti e correnti in abete, travi lamellari ed isolamento in fibra di legno per il caso di Villa GP e pannelli X-LAM per il caso del Complesso Cenni presso un centro di trasformazione sono la fonte principale di emissioni. Essa è rappresentata dal 53% per Villa GP e dal 46% per il Complesso Cenni. Le incidenze minori del 10% non sono state riportate nei grafici in quanto ritenute piuttosto irrilevanti rispetto alle altre voci (a titolo di esempio: le emissioni di CO₂eq prodotte dal trasporto di membrane impermeabilizzanti nel caso studio Avenida 1%, le emissioni di CO₂eq prodotte dal trasporto di pannelli in policarbonato e dell'intelaiatura metallica nel caso studio Melopee 0%, le emissioni di CO₂eq prodotte dal trasporto di montanti e guide in acciaio e lastre in cartongesso nel caso studio Villa GP 3% ed, infine, le emissioni di

| CO2eq3 kg | <i>MELOPEE SCHOOL</i> |
|---|-----------------------|
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di elementi della struttura di elevazione | 2630 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli in vetro antiscivolo | 270 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli in policarbonato e dell'intelaiatura metallica | 135 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di infissi e pareti leggere a secco | 270 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli in fibra di legno | 135 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli in fibramento | 135 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli per isolamento acustico in EPS | 68 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di laterizi forati | 840 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di cemento | 4620 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di calcestruzzo | 12810 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di membrane impermeabilizzanti | 68 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in PUR | 1680 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in lana di roccia | 525 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di blocchi di EPS | 1680 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli di materiale isolante in PUR | 1890 |
| TOTALE | 27756 |

TAB. 39 TABELLA RELATIVA ALLA TERZA ALIQUOTA DI EMISSIONI DEL SECONDO CASO STUDIO

| CO2eq3 kg | <i>VILLA GP</i> |
|--|------------------------|
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di montanti, correnti in abete, travi lamellari e isolamento di fibra di legno | 529 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di montanti e guide in acciaio e lastre in cartongesso | 28 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di isolante in lana di roccia, infissi e lastre di vetro | 43 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli OSB | 389 |
| TOTALE | 989 |
| CO2eq3 kg | <i>COMPLESSO CENNI</i> |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di pannelli X-LAM | 2669 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di montanti e guide in acciaio, tubolari in acciaio e lastre in cartongesso | 57 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di isolante in lana di roccia, infissi, lastre di vetro e frangisole in alluminio | 135 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di calcestruzzo (frantumazione) | 1307 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di barre di armatura | 590 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trasporto di calcestruzzo (smaltimento) | 1055 |
| TOTALE | 5813 |

TAB. 40 TABELLA RELATIVA ALLA TERZA ALIQUOTA DI EMISSIONI DEL TERZO E QUARTO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito
AVENIDA CENTRAL BUILDING

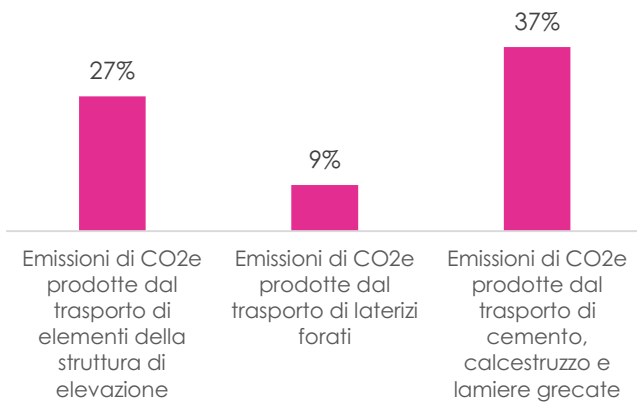


FIG. 77 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₃ PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO – PRIMO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito
MELOPEE SCHOOL

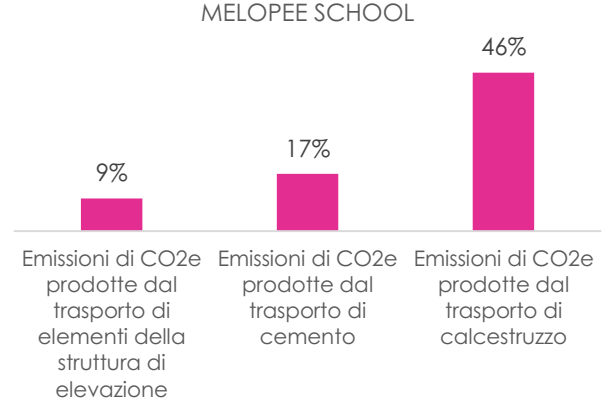


FIG. 78 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₃ PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO – SECONDO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito
VILLA GP

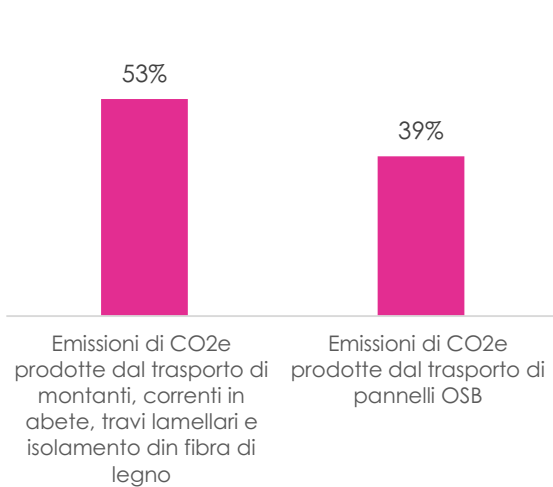


FIG. 79 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₃ PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO – TERZO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₃ prodotte dal trasporto fuori dal sito
COMPLESSO CENNI

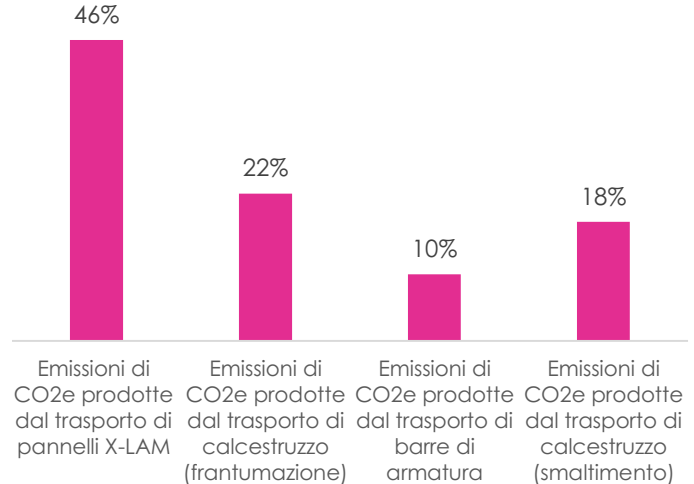


FIG. 80 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLE PERCENTUALI DELLE ALIQUOTE DI EMISSIONI DI CO₂EQ₃ PRODOTTE DAL TRASPORTO FUORI DAL SITO – QUARTO CASO STUDIO

| | |
|---|---|
| CO2eq4 kg | <i>AVENIDA CENTRAL BUILDING</i> |
| Emissioni di CO2e prodotte dalla rimozione delle imperfezioni generate dal procedimento di taglio in cantiere | 24 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal processo di zincatura | 5896 |
| TOTALE | 5920 |
| CO2eq4 kg | <i>MELOPEE SCHOOL</i> |
| Emissioni di CO2e prodotte dal taglio di porzioni di materiale precedentemente bullonate e/o avvitate | 38 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal processo di zincatura | 51291 |
| TOTALE | 51329 |
| CO2eq4 kg | <i>VILLA GP</i> |
| Emissioni di CO2e prodotte dall'operazione di piallatura delle travi lamellari | 35 |
| Emissioni di CO2e prodotte dall'operazione di rimozione di parti forate di montanti e correnti, travi lamellari, pannelli OSB | 45 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trattamento impregnante su montanti, correnti, travi lamellari | 0,48 |
| TOTALE | 80,48 |
| CO2eq4 kg | <i>COMPLESSO CENNI</i> |
| Emissioni di CO2e prodotte dall'operazione di piallatura dei pannelli X-LAM | 484 |
| Emissioni di CO2e prodotte dall'operazione di rimozione di parti forate di pannelli X-LAM | 162 |
| Emissioni di CO2e prodotte dal trattamento impregnante su pannelli X-LAM | 9 |
| Emissioni di CO2e prodotte dalla frantumazione del calcestruzzo | 9 |
| TOTALE | 664 |

I risultati ottenuti dalla stima dell'aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo mostrano che le emissioni per gli edifici in acciaio sono totalmente prodotte dal processo di zincatura; mentre, per gli edifici in legno la quasi totalità delle emissioni di CO_{2eq} è prodotta da operazioni di piallatura e di rimozione di parti forate, a meno dell'1% di emissioni generate dal trattamento impregnante e dalla frantumazione del calcestruzzo. Per Villa GP l'aliquota maggiore di emissioni di CO_{2eq} prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo è dovuta ad operazioni di rimozione di parti forate di montanti e correnti in abete, travi lamellari e pannelli OSB, generando 45,10 kg CO_{2eq}, cioè il 56%. Per il Complesso di Via Cenni l'aliquota maggiore di emissioni di CO_{2eq} prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo è dovuta ad operazioni di piallatura dei pannelli X-LAM, generando 484,06 kg CO_{2eq}, cioè il 73% (Fig. 81 – 82 – 83 – 84).

TAB. 41 TABELLA RELATIVA ALLA QUARTA ALIQUOTA DI EMISSIONI DI TUTTI E QUATTRO I CASI STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₄ prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo
AVENIDA CENTRAL BUILDING

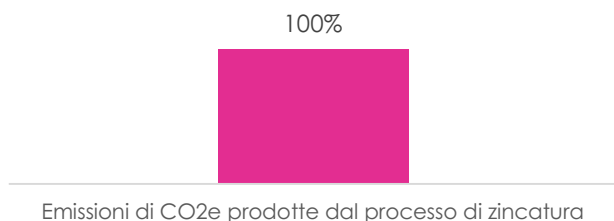


FIG. 81 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLA PERCENTUALE DI CO₂EQ₄ PRODOTTA DALLE ATTIVITÀ DI TRASFORMAZIONE/TRATTAMENTO PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO – PRIMO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₄ prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo
MELOPEE SCHOOL

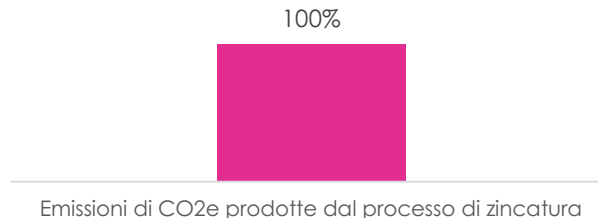


FIG. 82 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLA PERCENTUALE DI CO₂EQ₄ PRODOTTA DALLE ATTIVITÀ DI TRASFORMAZIONE/TRATTAMENTO PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO – SECONDO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₄ prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo
VILLA GP

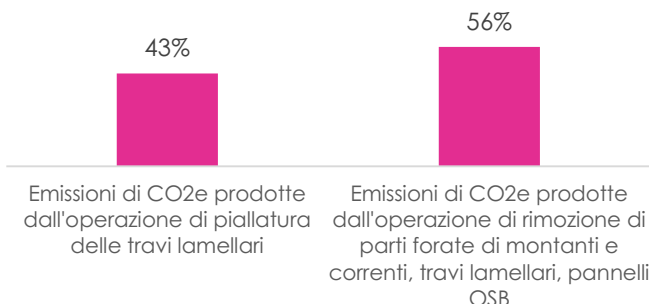


FIG. 83 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLA PERCENTUALE DI CO₂EQ₄ PRODOTTA DALLE ATTIVITÀ DI TRASFORMAZIONE/TRATTAMENTO PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO – TERZO CASO STUDIO

Percentuali delle aliquote di emissioni di CO₂eq₄ prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo
COMPLESSO CENNI

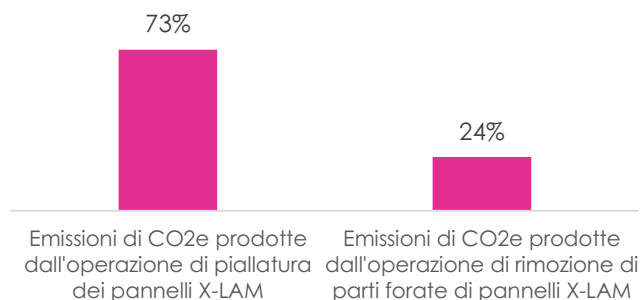


FIG. 84 ISTOGRAMMA RAPPRESENTATIVO DELLA PERCENTUALE DI CO₂EQ₄ PRODOTTA DALLE ATTIVITÀ DI TRASFORMAZIONE/TRATTAMENTO PER SUCCESSIVO RIUTILIZZO – QUARTO CASO STUDIO

Dall'analisi dell'aliquota di emissioni di CO₂eq₅ quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale che riguarda esclusivamente i casi studio in legno, si evince che il sistema costruttivo con pannelli X-LAM (Complesso Cenni), produce maggiori benefici in termini di risparmio di CO₂ rispetto al sistema costruttivo in legno con pannelli intelaiati, proprio della Villa GP. Il sistema in pannelli X-LAM è in grado di stoccare 10,67 kg CO₂eq/m³, mentre il telaio in legno 4,47 kg CO₂eq/m³.

Possiamo motivare tale divario in quanto i pannelli X-LAM presentano un valore di Embodied Carbon in valore assoluto maggiore rispetto ai valori di EC dei materiali che compongono i pannelli intelaiati, rispettivamente 0,437 e 1,21 kg CO₂eq/kg.

| CO₂eq⁵ | VILLA GP [kg CO₂eq] | COM- PLESSO CENNI [kg CO₂eq] |
|--|---|--|
| Aliquota negativa di CO ₂ eq quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale | -3490 | -129437 |
| | kg CO ₂ eq/m ³ | kg CO ₂ eq/m ³ |
| | -4,47 | -10,67 |

il secondo motivo è da ricercarsi nella quantità di sfrido di elementi in legno per m³, che nel caso del Complesso Cenni è 2,2 volte maggiore rispetto alla quantità di sfrido di elementi in legno nel caso di Villa GP.

TAB. 42 TABELLA RELATIVA ALLA QUINTA ALIQUOTA QUALE CREDITO COMPENSATIVO DI EMISSIONI PER STOCCAGGIO NEL MATERIALE LEGNO – TERZO E QUARTO CASO STUDIO

Sintesi dei risultati

Dopo l'applicazione del metodo si può evincere che tutti e quattro i casi studio superano abbondantemente la soglia del 70%, mentre la soglia del 15% dei materiali non strutturali (prevista dalla precedente versione dei CAM edilizia) non è soddisfatta dal caso studio numero 4, in quanto la natura stessa della tipologia costruttiva in X-LAM, prevalente nell'intero edificio e classificabile come edilizia di tipo pesante, non lascia spazio a un grande numero di componenti di altro materiale e natura.

Importante contributo alla possibilità di riutilizzo e riciclo dei materiali è stato dato dalla struttura di elevazione in acciaio costituente i primi due casi studio e dalla parte in cemento e calcestruzzo dei solai di Avenida Central Building e dalla parte in cemento e calcestruzzo dei solai e delle partizioni interne verticali di Melopee School.

Il grande potenziale di riutilizzo/recupero nel caso di Villa GP è dovuto soprattutto alla struttura intelaiata in montanti e correnti in abete, le travi lamellari ma anche i pannelli OSB.

Mentre, per l'ultimo caso studio, il Complesso Cenni, ciò è dovuto al gran numero di pannelli X-LAM, ai montanti in acciaio e alle lastre di cartongesso delle partizioni interne, ma anche alla presenza di calcestruzzo e barre di armatura dei solai in calcestruzzo (in compresenza con solai X-LAM).

Per quanto riguarda il Livello di Disassemblabilità sappiamo che l'applicazione del Metodo UNI a sistemi "saldati" comporta una fortissima sottostima del recupero degli elementi in acciaio "saldati" della struttura di elevazione, delle partizioni esterne inclinate e delle partizioni esterne verticali, in quanto esso associa un punteggio nullo a materiali prevalenti caratterizzati da saldature. L'applicazione del Metodo Sperimentale Integrato, invece, consente il superamento dell'approssimazione del metodo UNI, attraverso l'introduzione di una percentuale di riutilizzabilità, seppur bassa, per i sistemi saldati (40%), la quale consente di tener conto della possibilità di recuperare elementi in acciaio saldati attraverso tagli al plasma manuali effettuati in loco e successive attività di trasformazione.

Il dato che risulta immediatamente significativo è la percentuale molto alta per tutti e quattro di casi studio dell'aliquota di emissioni di CO₂eq prodotte dallo SFRIDO conseguente alle operazioni di demolizione; tale dato si attesta ad una percentuale dell'82% per il primo caso studio, al 69% per il secondo caso studio, al 53% per il terzo caso studio e, infine, ben al 92% per il quarto caso studio.

Per il caso studio Avenida Central Building, l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in vetro-mattoni risulta essere pari al 40%. Discorso opposto vale invece per il caso studio Melopee School, per il quale l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in cemento sale all'85%. La notevole differenza tra le emissioni generate dalla demolizione di solai in calcestruzzo, di pareti in laterizio e di pareti in vetro-mattoni o cemento è evidenziata dalla quantità di CO_{2eq} generata per m² di superficie demolita. Per il caso studio Avenida Central Building, grazie alla presenza di solai compositi con lamiera grecata e caldana in calcestruzzo, caratterizzati da spessori limitati (20 cm), l'attività di demolizione genera 1,42 kg di CO_{2eq} per m² di superficie demolita.

Per il caso studio Melopee School, invece, a causa della presenza di solai tradizionali in calcestruzzo gettati in opera, caratterizzati da spessori elevati (50 cm), l'attività di demolizione genera 2,16 kg di CO_{2eq} per m² di superficie demolita, ovvero 1,52 volte superiore alle emissioni generate dall'attività di demolizione per il caso studio Avenida Central Building. I risultati mostrano il contributo di solai compositi con lamiera grecata e caldana in CIs a ridurre, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva, le emissioni di CO_{2eq} prodotte dall'attività di demolizione. I solai compositi con lamiera grecata e caldana in CIs, in grado di sfruttare al meglio le prestazioni sia dell'acciaio che del calcestruzzo, consentono una riduzione delle sezioni trasversali e una riduzione dei volumi di materiale da demolire, con conseguente riduzione dei tempi di funzionamento e del consumo di carburante dei macchinari utilizzati per le attività di demolizione. L'altezza di un solaio composito, infatti, varia in genere dai 100 ai 150 mm, con luci da 2,50 a 3,00 m.

La notevole differenza tra le emissioni generate dallo sfrido degli elementi in acciaio è evidenziata dalla percentuale di acciaio riciclabile, rispetto a quella riutilizzabile, e dalla conseguente quantità di CO_{2eq} generata dallo sfrido per kg di materiale potenzialmente riutilizzabile. Per il caso studio Avenida Central Building, la prevalenza di unioni saldate rispetto alle unioni bullonate ha comportato una percentuale di acciaio riutilizzabile pari al 51%, leggermente superiore alla percentuale di acciaio riciclabile (sfrido) pari al 49%.

Per il caso studio Melopee school, la presenza di unioni unicamente bullonate ha comportato una percentuale di acciaio riutilizzabile pari al 75%, di gran lunga superiore alla percentuale di acciaio riciclabile (sfrido) pari al 25%. I risultati mostrano il contributo delle unioni bullonate ad aumentare, in un processo di disassemblaggio e demolizione selettiva di sistemi tecnologici "a secco" in acciaio, la quantità di acciaio riutilizzabile, a discapito della quantità di acciaio riciclabile e delle conseguenti emissioni di CO_{2eq} prodotte dallo sfrido. L'utilizzo esclusivo di avvitatori ad impulsi durante la fase di smontaggio consente di arrecare il minor danno possibile al materiale ed ottenere elevate percentuali di materiale riutilizzabile.

Per quanto riguarda l'incidenza delle emissioni di CO_{2eq} prodotte dal trasporto fuori dal sito, il materiale cemento, cls e lamiere grecate sono le più alte nei casi studi in acciaio mentre gli elementi della struttura portante in legno, ovvero montanti e correnti in abete, travi lamellari ed isolamento in fibra di legno per i casi studi in legno presso un centro di trasformazione sono la fonte principale di emissioni.

I risultati ottenuti dalla stima dell'aliquota di emissioni di CO_{2eq4} prodotte dalle attività di trasformazione/trattamento per successivo riutilizzo mostrano che le emissioni per gli edifici in acciaio sono totalmente prodotte dal processo di zincatura; mentre, per gli edifici in legno la quasi totalità delle emissioni di CO_{2eq} è prodotta da operazioni di piallatura e di rimozione di parti forate.

Dall'analisi dell'aliquota di emissioni di CO_{2eq5} quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale che riguarda esclusivamente i casi studio in legno, si evince che il sistema costruttivo con pannelli X-LAM (Complesso Cenni), produce maggiori benefici in

termini di risparmio di CO₂ rispetto al sistema costruttivo in legno con pannelli intelaiati, proprio della Villa GP. Il sistema in pannelli X-LAM è in grado di stoccare 10,67 kg CO_{2eq}/m³, mentre il telaio in legno 4,47 kg CO_{2eq}/m³.

Possiamo motivare tale divario in quanto i pannelli X-LAM presentano un valore di Embodied Carbon in valore assoluto maggiore rispetto ai valori di EC dei materiali che compongono i pannelli intelaiati, rispettivamente 0,437 e 1,21 kg CO_{2eq}/kg.

il secondo motivo è da ricercarsi nella quantità di sfido di elementi in legno per m³, che nel caso del Complesso Cenni è 2,2 volte maggiore rispetto alla quantità di sfido di elementi in legno nel caso di Villa GP. Uno studio della Aalto University, afferma che ad influenzare la quantità totale di stoccaggio del carbonio fornita dalla costruzione di edifici in legno è il volume di legno contenuto nell' edificio. Grazie a questa sua caratteristica, l'aliquota di CO_{2eq5} relativa allo stoccaggio del materiale, è un'aliquota negativa che riduce le emissioni totali.

CONCLUSIONI

L'edilizia pubblica come volano di innovazione per la progettazione

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) e la progettazione BIM sono da considerarsi punti cardine per la pubblica amministrazione, in quanto entrambi hanno l'obiettivo di innovare il settore delle opere pubbliche in ambito edile e, di riflesso, l'intero settore delle nuove costruzioni. Tali strumenti hanno in comune anche una visione olistica del sistema edificio, in termini di ciclo di vita. Le Pubbliche Amministrazioni giocano un ruolo chiave nella inevitabile trasformazione dell'intero settore edile. Il cambiamento in atto sta coinvolgendo, più o meno direttamente, tutti i professionisti e richiederà competenze sempre maggiori per essere competitivi nel settore. Il BIM è la metodologia che sta indirizzando verso la digitalizzazione dei processi di progettazione, utilizzando un unico ambiente di condivisione dei dati aperto a tutte le figure professionali coinvolte, riducendo i tempi e gli sprechi di risorse [234].

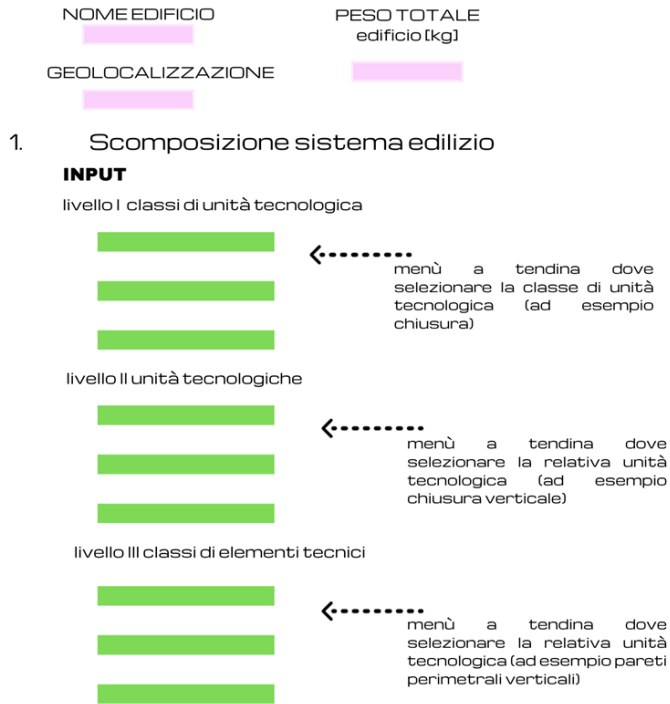
I CAM, come precedentemente esposto, sono requisiti obbligatori per le gare d'appalto di edifici pubblici che orientano tutti i servizi di progettazione, i lavori di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione verso un minor impatto ambientale e verso modelli di economia circolare.

Diverse soluzioni di software si trovano sul mercato a disposizione di professionisti e pubbliche amministrazioni, come ad esempio Termolog e Acustilog, specifici per la progettazione energetica dell'edificio; altri software sono dedicati agli impianti, allo scheletro strutturale, etc.

In relazione alle esigenze di tipo ambientale richieste esplicitamente nella fase di fine vita del sistema edificio, oggetto di analisi della presente ricerca, e il soddisfacimento dei criteri relativi a tale fase si potrebbe ipotizzare la creazione di un software di calcolo specifico da poter importare in altri sistemi software BIM, comprensivo dei criteri integrativi proposti e sviluppati dallo studio. Di seguito è sinteticamente rappresentato l'impostazione del modello di calcolo proposto con il nome **End-of-life Model Calculator** (fig. 85 - 86)

End-of-life Model Calculator

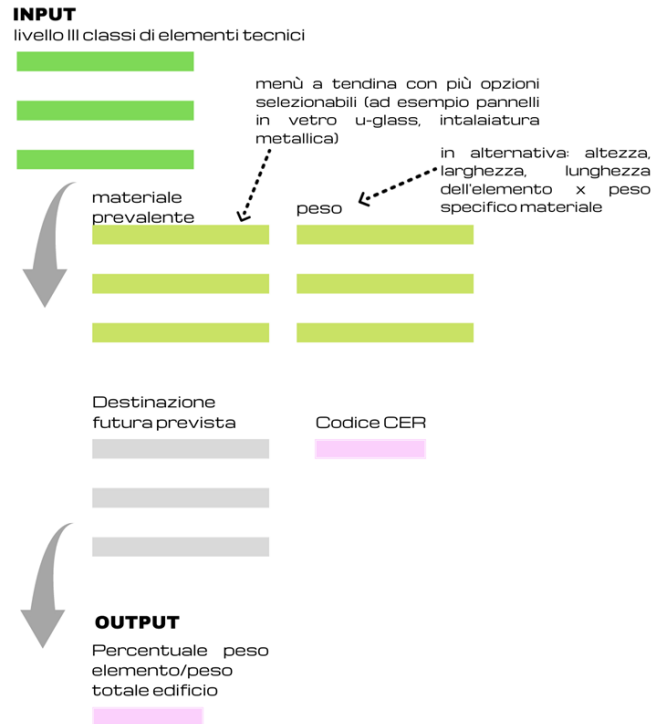
This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment



End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

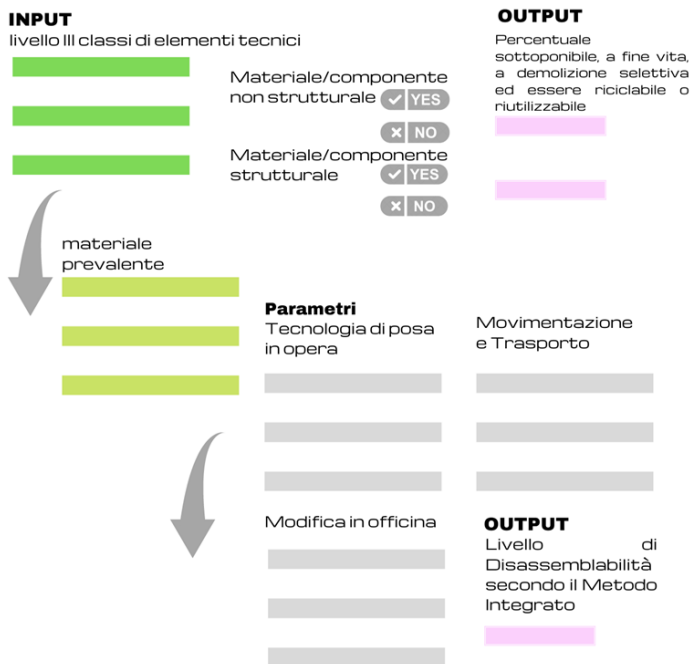
2. Risorse materiche in input ed in output - presunta destinazione dei materiali giunti a fine vita ai sensi dell'art. 2.3.7 Fine Vita e 2.6.6 Bilancio Materico



End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

3. Disassemblabilità art. 2.4.1.1 Soglie CAM e livello di Disassemblabilità



End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

4. Stima di emissioni CO2eq

Aliquota emissioni di CO2eq1 prodotte dall'attività di demolizione

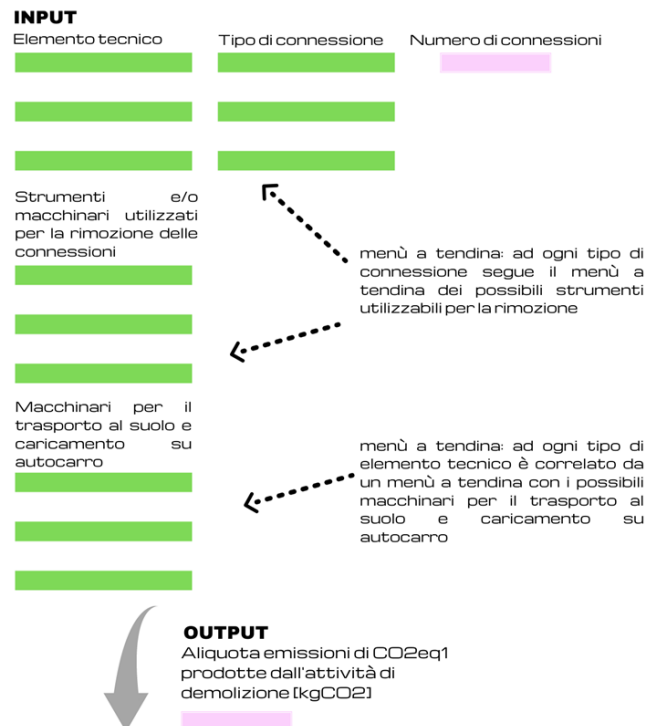


FIG. 85 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UNO SCHEMA TIPO DEL SOFTWARE End-of-life Model Calculator

End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

4. Stima di emissioni CO₂eq

Aliquota di emissioni di CO₂eq2 prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione

INPUT

| Elemento tecnico | Materiale prevalente | Embodied Carbon |
|------------------|----------------------|-----------------|
| [] | [] | [] |
| [] | [] | [] |
| [] | [] | [] |

output del calcolo percentuale di materiale che non si può recuperare dopo la rimozione, perché danneggiato (pari alla differenza tra la percentuale di materiale completamente riutilizzabile (100%) e la percentuale di materiale riutilizzabile desunta dall'indice di riutilizzabilità (IR))

I coefficienti di carbonio incorporato utilizzati sono desunti dall'Inventory of Carbon and Energy (ICE) e dall'Environmental Performance Construction (EPIC) in

OUTPUT

Aliquota di emissioni di CO₂eq2 prodotte dallo sfrido conseguente alle operazioni di demolizione [kgCO₂]

End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

4. Stima di emissioni CO₂eq

Aliquota di emissioni di CO₂eq3 prodotte dal trasporto fuori dal sito

INPUT

| Elemento tecnico | Quantità | Ubicazione centro di recupero/riciclaggio /smaltimento | Mezzo di trasporto |
|------------------|----------|--|--------------------|
| [] | [] | [] | [] |
| [] | [] | [] | [] |
| [] | [] | [] | [] |
| [] | [] | [] | [] |

possibili alternative di una seconda vita per l'elemento tecnico selezionato

a seconda dell'alternativa di seconda vita selezionato il sistema identifica sul territorio il centro di recupero/riciclaggio/smaltimento più vicino al cantiere

possibili alternative di mezzi di trasporto (con relativo fattore di emissione)

OUTPUT

Aliquota di emissioni di CO₂eq3 prodotte dal trasporto fuori dal sito [kgCO₂]

End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

4. Stima di emissioni CO₂eq

Aliquota di emissioni di CO₂eq4 prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo

INPUT

| Elemento tecnico | Quantità |
|------------------|----------|
| [] | [] |
| [] | [] |
| [] | [] |

| Attività di trasformazione | Numero di operazioni |
|----------------------------|----------------------|
| [] | [] |
| [] | [] |
| [] | [] |

numero ipotetico di operazioni necessarie per il raggiungimento di requisiti progettuali e prestazionali per poter rimettere l'elemento selezionato in un nuovo ciclo

OUTPUT

Aliquota di emissioni di CO₂eq4 prodotte dall'attività di trasformazione per successivo riutilizzo [kgCO₂]

End-of-life Model Calculator

This calculator can be used to calculate parameters between the boundaries C-D of Life Cycle Assessment

4. Stima di emissioni CO₂eq

Aliquota di emissioni di CO₂eq5 quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale

INPUT

| Elemento tecnico IN LEGNO | Peso (kg) |
|---------------------------|-----------|
| [] | [] |
| [] | [] |
| [] | [] |

| Embodied Carbon |
|-----------------|
| [] |
| [] |
| [] |

I coefficienti di carbonio incorporato utilizzati sono desunti dall'Inventory of Carbon and Energy (ICE) e dall'Environmental Performance Construction (EPIC) in

OUTPUT

Aliquota di emissioni di CO₂eq5 quale credito compensativo di emissioni per stoccaggio nel materiale [kgCO₂]

OUTPUT FINALE

Stima delle emissioni di CO₂eq totali a seguito di una demolizione selettiva [kgCO₂]

FIG. 86 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UNO SCHEMA TIPO DEL SOFTWARE *End-of-life Model Calculator*

Alla fine della compilazione del modello e della generazione dei dati richiesti dalla normativa in merito di soddisfacimento di Criteri Ambientali Minimi nelle fasi finali del ciclo di vita di un edificio (fasi C e D del Life Cycle), il sistema produrrà automaticamente una relazione che risulterà essere un allegato indispensabile nella documentazione richiesta dai disciplinari di gara, in particolar modo in fase di progettazione ed esecuzione, e per ottenere punteggi aggiuntivi di tipo premiante in fase di aggiudicazione dell'appalto.

Inoltre, tale software potrebbe essere collegato ad una piattaforma web in cui ogni utente che utilizzerà il software di calcolo andrà automaticamente ad integrare un database di elementi/materiali/componenti edili di "seconda mano", alimentando il mercato di offerta attraverso una maggiore disponibilità e varietà di prodotti; tali prodotti verranno corredati di certificazioni a seguito di controlli di qualità e sicurezza in modo tale da essere inseriti sul mercato alla stessa stregua di materiale nuovo.

Questa possibilità di creazione di un market di prodotti edili di seconda mano è stata negli anni sviluppata in diversi progetti a carattere perlopiù territoriale e settoriale. L'Italia avendo un costruito storico piuttosto importante disseminato in tutte le città e piccoli comuni, è una nazione che è sempre stata più rivolta alla conservazione piuttosto che alla demolizione e ricostruzione (con utilizzo degli scarti di demolizione in situ). Questo approccio conservativo è stato legato per lungo tempo anche al basso tasso di recupero degli scarti di C&D (costruzione e demolizione) e alla loro mancata reintroduzione nella filiera edilizia. Diversi sono stati i progetti e le esperienze di ricerca sul tema, come ad esempio nel 1998-2002 (ed una seconda fase nel 2006) il progetto VAMP (Valorizzazione Materiali e Prodotti da demolizione), che sviluppò una soluzione sperimentale per facilitare il riutilizzo e il riciclo di materiali e componenti di C&D; il progetto prevede un sistema informativo online che permette l'incontro tra domanda e offerta di elementi da C&D a livello locale. Ed ancora, tra il 2000 e il 2002 si è svolto il PRIN (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) con un progetto dal nome Strategie per la promozione della pratica del riciclaggio in architettura. In generale, l'esperienza italiana, piuttosto controversa, è costellata da punti di eccellenza e dinamiche di arretratezza (dovute alla banale mancanza di recupero dei rifiuti C&D). Da segnalare è una filiera piuttosto virtuosa, quella legata al materiale del legno, per la quale il riciclo avviene per ogni tipologia di scarto, a partire dagli imballaggi [15].

È indubbio che sarebbe estremamente utile organizzare un mercato dell'usato a cui i produttori di scarti e gli acquirenti (riutilizzatori) possano accedere in modo rapido e semplice. Esistono diverse piattaforme online dove trovare queste risorse edili su un preciso territorio ed anche strumenti di geolocalizzazione degli impianti di trattamento, riciclo e stoccaggio per riuso; in Italia sono organizzate per territori comunali come, ad esempio, VAMP-TO che interessa la provincia di Torino oppure Atlante Inerti che interessa la provincia di Ferrara, ma manca uno strumento di consultazione a livello nazionale. Inoltre, la maggior parte di tale mercato interessa principalmente gli inerti, probabilmente a causa della maggiore presenza di edifici in c.a. e in muratura disseminati sul territorio italiano.



FIG. 87 LOGO DEL PROGETTO STATUNITENSE PLANETREUSE

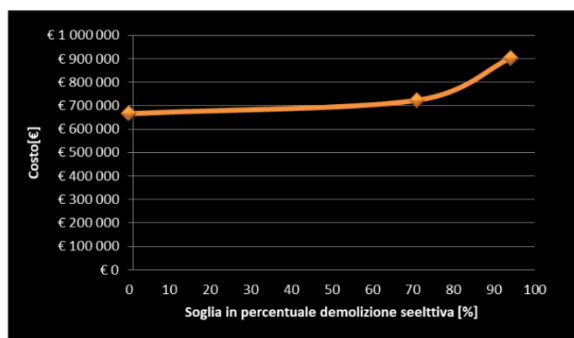
E' auspicabile la creazione di un unico portale sempre aggiornato che copra l'intero territoriale nazionale e che comprenda tutte le tipologie di materiali e componenti edili ottenibili a seguito di una demolizione selettiva, sulla base di esperienze estere come l'olandese Harvestmap e la statunitense PlanetReuse, che inoltre offre un servizio di consulenza e collaborazione con

progettisti e costruttori durante la progettazione e realizzazione per sviluppare soluzioni di riuso comprendendo anche un servizio di raggiungimento di crediti per il riuso nel protocollo LEED.

Recuperare o demolire e ricostruire: questo è il dilemma

A questo punto ci si pone l'amletica domanda se recuperare il patrimonio esistente è preferibile alla demolizione (con una conseguente ricostruzione). È logico che per un patrimonio edilizio esistente con un valore storico e artistico predisporre un piano di recupero e/o restauro sia la soluzione da seguire, ma per quel costruito non legato al tessuto urbano da fattori rilevanti come quelli storici, artistici e sociali, le valutazioni da fare sono legate ad altri parametri, come ad esempio il fattore economico e il fattore ambientale. Quest'ultimo ha raggiunto un grado di urgenza e rilevanza negli ultimi anni da oscurare in parte i benefici meramente economici. Frequentemente la riduzione dei 'costi indiretti', ossia relativi alla riduzione dell'impatto ambientale, si traduce in un aumento dei 'costi diretti', legati ad un processo di demolizione.

Un precedente studio dell'autrice, pubblicato nel 2019 [235], ha evidenziato un incremento



di costi diretti (intuitivamente atteso) tra l'organizzazione del cantiere tradizionale e l'organizzazione del cantiere predisposto per i CAM di base soltanto dell'8,6%; mentre, ai fini dell'ottenimento dei requisiti premianti (quindi non obbligatori) ha determinato un incremento di costi del 35% in più rispetto al cantiere di demolizione di tipo tradizionale. Quindi, non sempre perseguire l'obiettivo ambientale (in questo caso gli obiettivi di base dei CAM) presuppone costi di gestione intollerabili (fig. 88).

FIG. 88 ANDAMENTO DEI COSTI IN FUNZIONE DELL'INCREMENTO PERCENTUALE DI DEMOLIZIONE SELETTIVA RISULTATO DALLO STUDIO 'LA GESTIONE DELLA DEMOLIZIONE SELETTIVA



FIG. 89 OLYMPIC PARK A LONDRA

Ad avallare questa tesi ci sono numerosi possibili scenari tecnologici che consentono di ottimizzare il riuso e/o riciclo dei materiali, provenienti dal processo di demolizione, nell'ambito del progetto di ricostruzione dello stesso cantiere, al fine di ottenere economie che possano in parte compensare il maggiore onere economico derivante dal processo demolitivo, primi fra tutti è l'esempio dell'Olympic Park a Londra (fig. 89),

dove sono stati recuperati ai fini del riuso 1666 tonnellate di componenti con 908 tonnellate di CO2 incorporata. Il recupero di componenti metalliche ha portato i maggiori benefici ambientali in quanto l'acciaio recuperato ha un embodied energy 25 volte inferiore rispetto all'acciaio nuovo. Inoltre, molti edifici pre-esistenti oggetto di demolizione erano costruiti in mattoni facilmente recuperabili; in questo caso il processo di decostruzione adottato ha richiesto lo stesso tempo di una demolizione senza recupero di materiale e soltanto due operai in più [236].

LINEE GUIDA per il Design for Deconstruction: costruire anticipando il riuso

La spinta del PNRR si concretizza proprio in opere appaltate: l'ultimo rapporto Cresme sulle opere pubbliche di inizio agosto rileva infatti un nuovo record di aggiudicazioni nei primi sette mesi del 2022, con un totale di 28202 milioni di euro e un incremento del 20,7% rispetto

ai 23374 milioni del periodo gennaio-luglio 2021. Non si può escludere anche un'ulteriore accelerazione perché è evidente che la macchina del PNRR ha lavorato a regime nell'anno 2022, l'anno dei bandi di gara e delle conclusioni delle gare con le aggiudicazioni. Dunque, si costruisce ancora in Italia ed è proprio il settore delle nuove costruzioni che deve mettere in pratica la strategia del *Design for Deconstruction*, ovvero progettare un edificio progettando la sua decostruibilità e la disassemblabilità dei suoi elementi tecnici per poter recuperare, a fine vita utile dell'organismo edilizio o delle sue parti, i componenti e i materiali che li compongono [237]. Una volta stabilita la durata di vita utile dell'edificio, è importante seguire alcuni principi chiave a livello progettuale e tecnologico, con l'obiettivo di massimizzare il recupero delle componenti ai fini del riuso/riciclo (Tab.43).

| | CRITERI PROGETTUALI PER GLI EDIFICI | CRITERI PROGETTUALI RELATIVI ALLA GESTIONE | CRITERI PROGETTUALI RELATIVE AL CANTIERE |
|---|--|---|---|
| <i>Uso della prefabbricazione</i> | | | |
| <i>Utilizzo di costruzioni modulari</i> | | | |
| <i>Uso di materiali ecosostenibili</i> | | | |
| <i>Identificare i materiali e le componenti</i> | | | |
| <i>Progettazione di smontaggio e decostruzione simultanei e paralleli</i> | | | |
| <i>Progettazione della decostruzione con strumenti e attrezzature comuni (piuttosto che su misura)</i> | | | |
| <i>Numero minimo di componenti di tipo diverso</i> | | | |
| <i>Numero minimo di tipi diversi di materiali nello stesso edificio</i> | | | |
| <i>Numero minimo di materiali diversi nella stessa unità tecnologica</i> | | | |
| <i>Utilizzo di connessioni meccaniche (rispetto a quelle chimiche)</i> | | | |
| <i>Facile accesso alla decostruzione (soprattutto per le connessioni)</i> | | | |
| <i>Componenti dimensionati per adattarsi a mezzi di movimentazione appropriati</i> | | | |
| <i>Utilizzo di connettori, fissaggi e componenti per uso ripetuto</i> | | | |
| <i>Numero minimo di tipi diversi di connettori</i> | | | |
| <i>Materiali alternativi a quelli tossici e pericolosi</i> | | | |
| <i>Riduzione del materiale di sfido a seguito di una demolizione</i> | | | |
| <i>Attività di trasformazione/trattamento preferibilmente in cantiere</i> | | | |
| <i>Utilizzo di elementi/materiali/componenti a seguito di una demolizione selettiva nell'ambito dello stesso cantiere</i> | | | |

TAB. 43 TABELLA RAPPRESENTATIVA DELLE LINEE GUIDA ESTRAPOLATE A SEGUITO DELLO STUDIO CONDOTTO

Questa ricerca ha voluto evidenziare alcuni dei punti chiave alla base della *DfD*, in primo luogo, alcune scelte importanti riguardano la struttura portante dell'edificio: la separazione della struttura portante dall'involucro e l'utilizzo di una maglia standard per massimizzare gli elementi strutturali recuperabili.

Un altro punto chiave risulta essere il concetto di stratificazione e delle connessioni delle componenti, le quali devono garantire una facile accessibilità e rimovibilità. Anche le sequenze di assemblaggio generano rallentamenti in fase di decostruzione, sono infatti da preferire sistemi assemblati in parallelo (rispetto a quelli assemblati in sequenza). Per le connessioni è fondamentale, inoltre, la loro reversibilità, come si è visto infatti è da evitare l'uso di adesivi e resine. Le connessioni devono essere progettate con sistemi di fissaggio semplice e sostituibile, evidenziate in modo da facilitarne lo smontaggio ed anche resistenti in modo che sopportino ripetuti assemblaggi e disassemblaggi.

I principi alla base della *DfD* portano inevitabilmente a preferire costruzioni a secco per la loro intrinseca proprietà di decomposizione delle loro parti. In questa ricerca ci si è focalizzati principalmente sui sistemi a secco caratterizzati, da un lato, dal materiale acciaio e, dall'altro, dal materiale legno. L'acciaio, grazie alle sue caratteristiche di leggerezza e flessibilità, consente di realizzare ambienti estremamente liberi in pianta e in facciata. Il telaio strutturale si svincola dalla partizione interna e dal tamponamento permettendo anche una certa libertà spaziale, che è presente nei telai in acciaio [235] ma anche in legno. Il legno, inoltre, è un materiale naturale al 100% e costituisce il 99,4% di un pannello X-LAM (la percentuale restante è interamente costituita dalla colla). È completamente riciclabile, non inquina né durante la messa in opera né durante la realizzazione del prodotto. Le strutture in legno, con il loro basso consumo energetico, costituiscono inoltre un'ottima soluzione per combattere lo spreco delle energie non rinnovabili.

Nel presente studio i quattro edifici rappresentativi di tali tecnologie che sono stati oggetto di analisi, mostrano di soddisfare pienamente la soglia CAM di materiale da recuperare e/o riciclare a fine vita a seguito di una demolizione selettiva; inoltre, si evince che alcuni sistemi di fissaggio sono da preferirsi ad altri grazie al loro livello di disassemblabilità (indagato con maggiore approfondimento grazie al Metodo Sperimentale Integrato). Ed infine, si è pervenuto ad un minore impatto totale di emissioni di CO_{2eq} dovuto alle operazioni di demolizione per gli edifici prevalentemente in legno, per la loro intrinseca proprietà di stoccare carbonio.

L'approccio conservatore vs alternative esistenti nel mondo dell'edilizia

La Terra potrebbe essere definita il 'pianeta grigio' in quanto il cemento e i suoi derivati esistenti superano per peso la biomassa di tutti gli alberi della Terra. Lo storico dell'ambiente Vaclav Smil nel suo *Making the Modern World: Materials and Dematerialization* osserva che in Paesi in via di progresso all'inizio il cemento migliora enormemente le condizioni di chi vive nell'indigenza materiale (un esempio è la pavimentazione del terreno nudo può ridurre le malattie parassitarie fino all'80%), ma presto i suoi effetti benefici rallentano, lasciando città e paesaggi estremamente mutati [238].

Oggi il cemento evoca sentimenti ambivalenti e si tenta di tutto per nascondere, eppure proprio il cemento e il suo derivato per eccellenza, il calcestruzzo, hanno mostrato quanto un semplice materiale possa trasformare la cultura e la società. Economico, resistente e facile da lavorare, è stato il cemento a permettere la ricostruzione fulminea del dopoguerra e aprire alle masse il mercato edilizio, diventando sinonimo di sviluppo economico e modernità. In Italia è successo proprio questo durante il boom economico del secondo dopoguerra dando vita a quartieri interi, paesi e città deturpati da mastodontici edifici in calcestruzzo armato alle volte lasciati nello stato del 'non finito' tipico delle regioni meridionali o gestiti da una cattiva o del tutto assente manutenzione. Se parliamo di impatto ambientale, il cemento e i suoi derivati continuano a far parlare di sé negativamente. Dopo l'acqua, il

calcestruzzo è il materiale in assoluto più utilizzato al mondo ed è di gran lunga il più comune materiale da costruzione. Il settore edilizio assorbe da solo metà dell'energia elettrica globale, un decimo delle risorse idriche. Se parliamo di emissioni di CO₂ il cemento è responsabile dell'8% delle emissioni mondiali, a precederlo solo carbone, petrolio e gas [239]. A questo punto è necessario riformulare la mentalità e le abitudini ormai consolidate in edilizia. Secondo Tom Webster, direttore di Webb Yates, l'acciaio, sebbene sia pubblicizzato come sostenibile, in effetti, aumenta il carbonio incorporato in un edificio rispetto ad altri materiali strutturali. "In termini di carbonio, non ha buone prestazioni", ha affermato, "anche se la quantità di materiale è piuttosto minima". L'acciaio è superficialmente molto buono nell'economia circolare perché è riciclabile al 100%, ma il processo di riciclaggio è ad alta intensità energetica. Finché non saremo in grado di decarbonizzare l'elettricità utilizzata per riciclare l'acciaio (data stimata 2050), è molto meglio riutilizzarla. Ciò richiede a progettisti e ingegneri di pensare in modo diverso. La cosa migliore ovviamente è riutilizzare l'acciaio strutturale in situ, ma dove ciò non è possibile, l'acciaio dovrà essere smontato, testato, certificato e riutilizzato. I progettisti dovranno quindi progettare con ciò che è disponibile, anziché progettare elementi specifici. Il vantaggio di riutilizzare una struttura in acciaio è che l'impronta di carbonio per la nuova struttura in acciaio è quasi nulla.

Per quanto riguarda i materiali alternativi, in bioedilizia si sperimentano da tempo materiali come la canapa, i biomattoni composti da colonie di batteri [240], ma è soprattutto il legno a farla da padrone, in quanto a parità di peso e di costo, gli alberi cresciuti in silvicoltura sequestrano più anidride carbonica delle altre fibre vegetali, e una volta trasformati in pannelli possono stoccare il carbonio in maniera stabile e duratura, con effetti di mitigazione del riscaldamento globale.

Negli ultimi anni il mercato della bioedilizia in legno in Italia vede consolidare la sua quota di mercato nelle costruzioni. Federlegno attesta che le importazioni nel settore delle costruzioni si attestano nel 2021 a 27 milioni di euro, i produttori di edifici in legno sono aumentati del 12% dal 2019 e che la spinta principale arriva dal rinnovo residenziale e dalle opere pubbliche [241]. L'Italia si piazza al 4° posto in Europa (dietro a Germania, Svezia, UK e davanti all'Austria) nella produzione di edifici prefabbricati in legno, ben 3200 abitazioni, con un fatturato complessivo di 724 milioni di euro. Le regioni più redditizie sono il Trentino-Alto Adige (21%), Veneto (16%), Lombardia (16%) ed Emilia-Romagna (8%), ma il trend sta coinvolgendo sempre più anche le regioni meridionali; infatti, si sta espandendo verso il Sud Italia coinvolgendo soprattutto le zone costiere, le località turistiche e le isole come riporta Alessandro Lacedelli, consigliere di Assolegno e amministratore delegato della Rubner Objektbau. A evolvere è anche la qualità architettonica dei progetti: archiviata da tempo l'idea che la casa in legno coincida con una baita di montagna o una costruzione in serie (perché prefabbricata), si moltiplicano gli edifici realizzati su misura e che guardano al futuro, spingendo sul design, sull'efficienza e sulla versatilità delle forme. Per poter consolidare questa tendenza è essenziale che anche la cultura e la formazione, compresa quella universitaria, cambino come suggerisce Franco Laner, professore ordinario di Tecnologia dell'architettura all'Iuav di Venezia. L'ingegneria del legno è proprio un ramo dell'ingegneria civile relativo alla progettazione strutturale di opere in legno ma il suo insegnamento è stato solo di recente istituito ed è presente solo in alcuni corsi di Laurea Magistrale, nello specifico presso l'Università dell'Aquila, Bolzano, Firenze, Milano e Trento.

Infatti, fino ai primi anni '70 del XX secolo gli ingegneri civili non ricevevano pressoché alcuna formazione universitaria sulla tecnica delle costruzioni in legno, anche per il fatto che le normative tecniche italiane non trattavano, né contemplavano l'utilizzo del legno come materiale strutturale. Eccezione per l'Alto Adige dove l'instaurarsi di stabilimenti di prefabbricazione di elementi strutturali in legno lamellare di grandi dimensioni ha portato all'impiego del legno per opere di grande importanza statica e ha costretto gli uffici tecnici di

queste aziende di dotarsi di un proprio staff interno, perlopiù di formazione nord-europea come supporto ai progettisti per il dimensionamento statico ed i progetti esecutivi.

Note conclusive

L'idea del reimpiego di elementi architettonici aveva assunto nell'epoca contemporanea un interesse legato maggiormente ad un aspetto figurativo piuttosto che pratico, inteso come frammenti di un passato da richiamare alla memoria o da citare come impronta in un progetto nuovo. Soltanto negli ultimi anni il concetto di riciclaggio/riuso, considerato dal punto di vista prettamente materiale, ha investito non solo la dimensione domestica (pratica oramai ampiamente consolidata in questo ambito) ma anche altri settori, come appunto il mondo dell'edilizia. Oramai, l'urgenza climatica pone di fronte alla necessità di un approccio produttivo *green* secondo il quale bisogna ricevere le materie comunemente chiamate 'di scarto' e restituire loro un valore, come avviene nei cicli biologici in natura, e contemporaneamente prevenire la produzione massiva di rifiuti nel corso dell'intero ciclo di vita dell'edificio, mediante soluzioni tecnologiche rispondenti al requisito della disassemblabilità. Come detto in precedenza, l'innovazione deve avvenire a livello progettuale in primis anche attraverso l'aggiornamento di tutte quelle procedure preliminari alla realizzazione del manufatto, sia a livello delle gare e sia a livello della gestione di tali prodotti un tempo considerati rifiuti. Se la spasmodica volontà di sviluppo economico e tecnologico a tutti i costi, a discapito dell'ambiente, può essere vista come uno dei principali fondamenti dell'era moderna, dunque, considerate le conseguenze che stiamo già iniziando a vivere sulla nostra pelle (primi fra tutti i repentini e disastrosi cambiamenti climatici) si può affermare che la modernità ha fallito. Citando il premio Nobel Albert Einstein '...la modernità ha fallito. Bisogna costruire un nuovo umanesimo altrimenti il pianeta non si salverà'.

Bibliografia

- [1] *Analisi del rischio: i cambiamenti climatici in Italia. Centro Euro – Mediterraneo sui cambiamenti climatici (cmcc), settembre 2020.*
- [2] *2030 Climate target plan. CE, 17 settembre 2020.*
- [3] *Gas serra. ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.*
- [4] *Tracker, The Climate Action.*
- [5] *Global status report for building and construction. Global Alliance for Buildings and Construction, 1 gennaio 2020.*
- [6] *Global status report for building and construction. Global Alliance for Buildings and Construction, 2021.*
- [7] *PUBLIC PROCUREMENT FOR A CIRCULAR ECONOMY Good practice and guidance - ec.europa.eu/environment/gpp.*
- [8] *Cellura T. L'applicazione dei criteri ambientali minimi negli appalti pubblici, Volume 56 di Appalti & Contratti, Maggioli Editore, 2018.*
- [9] *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design).*
- [10] *Protocollo ITACA (Istituto per l'innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale).*
- [11] *Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione di interventi edilizi, per l'appalto di lavori per interventi edilizi e per l'appalto congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi (DECRETO 23 giugno 2011)..*
- [12] *Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile. ONU, 25 settembre 2015.*
- [13] *Bringing embodied carbon upfront. World Green Building Council, settembre 2019.*
- [14] *Commoner B, The Closing Circle: Nature, Man, and Technology, Courier Dover Publications, 2020.*
- [15] *Altamura P., Costruire a zero rifiuti. Strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto in edilizia, FrancoAngeli 2016.*
- [16] *ISO - International Organization for Standardization, ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework., 2006. URL consultato il 4 luglio 2019..*
- [17] *Norouzi M., Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis, Journal of Building Engineering, vol. Volume 44, 2021.*
- [18] *MyClimate Shape our future.*
- [19] *Norouzi M., Chàfer M., Cabeza L.F., Jiménez L., Boer D., Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis, Journal of Building Engineering, Volume 44 (2021) 102704, ISSN 2352-7102.*

- [20] M. Puettmann, F. Pierobon, I. Ganguly, H Gu, C. Chen, S. Liang, S. Jones, I. Maples, M. Wishnie, *Comparative LCAs of Conventional and Mass Timber Buildings in Regions with Potential for Mass Timber Penetration*, *Sustainability* (2021), 13, 13987.
- [21] D. Freier Raine, F. Muhammad-Sukki, R. Ramirez-Iniguez, J. A. Ardila-Rey, T. Jafry, C. Gamio, *Embodied Energy and Cost Assessments of a Concentrating Photovoltaic Module*, *Sustainability* (2021), 13, 13916.
- [22] A. Lavercombe, X. Huang, S. Kaewunruen, *Machine Learning Application to Eco-Friendly Concrete Design for Decarbonisation*, *Sustainability* (2021), 13, 13663.
- [23] R. Chaggaris, S. Pei, G. Kingsley, A. Feitel, *Carbon Impact and Cost of Mass Timber Beam–Column Gravity Systems*, *Sustainability* (2021), 13, 12966.
- [24] I. Faridmehr, M.L. Nehdi, M. Nikoo, K.A. Valerievich, *Predicting Embodied Carbon and Cost Effectiveness of Post-Tensioned Slabs Using Novel Hybrid Firefly ANN*, *Sustainability* (2021), 13, 12319.
- [25] M. Hu, *Beyond Operational Energy Efficiency: A Balanced Sustainability Index from a Life Cycle Consideration*, *Sustainability* (2021), 13, 11263.
- [26] F.S. Keskin, P. Martinez-Vazquez, C. Baniotopoulos, *An Integrated Method to Evaluate Sustainability for Vulnerable Buildings Addressing Life Cycle Embodied Impacts and Resource Us*, *Sustainability* (2021), 13, 10204.
- [27] L. Jankovic, S. Carta, *BioZero—Designing Nature-Inspired Net-Zero Building*, *Sustainability* (2021), 13, 7658.
- [28] H.S. Kim, I. Kim, W.H. Yang, S.Y. Moon, J.Y. Lee, *Analyzing the Basic Properties and Environmental Footprint Reduction Effects of Highly Sulfated Calcium Silicate Cement*, *Sustainability* (2021), 13, 7540.
- [29] F.P.V Ferreira, K.D Tsavdaridis, C.H. Martins, S. De Nardin, *Steel-Concrete Composite Beams with Precast Hollow-Core Slabs: A Sustainable Solution*, *Sustainability* (2021), 13, 4230.
- [30] B. Dorsey, *Refocusing on Sustainability: Promoting Straw Bale Building for Government-Assisted, Self-Help Housing Programs in Utah and Abroad*, *Sustainability* (2021), 13, 2545.
- [31] A. Nawarathna, M. Siriwardana, Z. Alwan, *Embodied Carbon as a Material Selection Criterion: Insights from Sri Lankan Construction Sector*, *Sustainability* (2021), 13, 2202.
- [32] D Lee, S. Son, D. Kim, S. Kim, *Special-Length-Priority Algorithm to Minimize Reinforcing Bar-Cutting Waste for Sustainable Construction*, *Sustainability* (2020), 12, 5950.
- [33] P. Mercader-Moyano, M. Ramos-Martín, *Comprehensive Sustainability Assessment of Regenerative Actions on the Thermal Envelope of Obsolete Buildings under Climate Change Perspective*, *Sustainability* (2020), 12, 5495.
- [34] Z Chen, H Gu, R.D. Bergman, S. Liang, *Comparative Life-Cycle Assessment of a High-Rise Mass Timber Building with an Equivalent Reinforced Concrete Alternative Using the Athena Impact Estimator for Buildings*, *Sustainability* (2020), 12, 4708.
- [35] M Hanafi, A. Ekinci, E. Aydin, *Triple-Binder-Stabilized Marine Deposit Clay for Better Sustainability*, *Sustainability* (2020), 12, 4633.
- [36] Whitworth, A.H.; Tsavdaridis, K.D. *Genetic Algorithm for Embodied Energy Optimisation of Steel-Concrete Composite Beams*. *Sustainability* 2020, 12, 3102.

- [37] M. Almeida, R. Barbosa, R. Malheiro, *Effect of Embodied Energy on Cost-Effectiveness of a Prefabricated Modular Solution on Renovation Scenarios in Social Housing in Porto, Portugal*, *Sustainability* (2020), 12, 1631.
- [38] E. Sicignano, G. Di Ruocco, R. Melella, *Mitigation Strategies for Reduction of Embodied Energy and Carbon, in the Construction Systems of Contemporary Quality Architecture*, *Sustainability* (2019), 11, 3806.
- [39] G. Kang, H. Cho, D. Lee, *Dynamic Lifecycle Assessment in Building Construction Projects: Focusing on Embodied Emissions*, *Sustainability* (2019), 11, 3724.
- [40] O. Iuorio, A. Wallace, K. Simpson, *Prefabs in the North of England: Technological, Environmental and Social Innovations*, *Sustainability* 2019, 11, 3884.
- [41] D. Lee, G. Kang, C. Nam, H. Cho, K.I. Kang, *Stochastic Analysis of Embodied Carbon Dioxide Emissions Considering Variability of Construction Sites*, *Sustainability* (2019), 11, 4215.
- [42] I Paik, S. Na, *Comparison of Carbon Dioxide Emissions of the Ordinary Reinforced Concrete Slab and the Voided Slab System During the Construction Stage: A Case Study of a Residential Building in South Korea*, *Sustainability* (2019), 11, 3571.
- [43] A.U. Zaman, J. Arnott, K. McIntyre, J. Hannon, *Resource Harvesting through a Systematic Deconstruction of the Residential House: A Case Study of the 'Whole House Reuse' Project in Christchurch, New Zealand*, *Sustainability* (2018), 10, 3430.
- [44] R. Melella, G. Di Ruocco, A. Sorvillo, *Circular Construction Process: Method for Developing a Selective, Low CO₂eq Disassembly and Demolition Plan*, *Sustainability* (2021), 13, 8815.
- [45] A. Williamson, S. Finnegan, *Sustainability in Heritage Buildings: Can We Improve the Sustainable Development of Existing Buildings under Approved Document L?* *Sustainability* (2021), 13, 3620.
- [46] J K. Allan, A.R. Phillips, *Comparative Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Low and Mid-Rise Mass Timber Buildings with Equivalent Structural Steel Alternatives*, *Sustainability* (2021), 13, 3401.
- [47] F. Bazzocchi, C. Ciacci, V. Di Naso, *Evaluation of Environmental and Economic Sustainability for the Building Envelope of Low-Carbon Schools*, *Sustainability* (2021), 13, 1702.
- [48] D. Gajić, S. Peulić, T. Mavrič, A. Sandak, C. Tavzes, M. Malešević, M. Slijepčević, *Energy Retrofitting Opportunities Using Renewable Materials—Comparative Analysis of the Current Frameworks in Bosnia-Herzegovina and Slovenia*, *Sustainability* (2021), 13, 6.
- [49] J. Payá, J. Monzó, J. Roselló, M.V. Borrachero, A. Font, L. Soriano, *Sustainable Soil-Compacted Blocks Containing Blast Furnace Slag (BFS) Activated with Olive Stone BIOMASS Ash (OBA)*, *Sustainability* (2020), 12, 9824..
- [50] F. Montana, K. Kanafani, K.B. Wittchen, H. Birgisdottir, S. Longo, M. Cellura, E. Riva Sanseverino, *Multi-Objective Optimization of Building Life Cycle Performance. A Housing Renovation Case Study in Northern Europe*, *Sustainability* (2020), 12, 7807.
- [51] X. Yin, Q. Dong, S. Zhou, J. Yu, L. Huang, C. Sun, *Energy-Saving Potential of Applying Prefabricated Straw Bale Construction (PSBC) in Domestic Buildings in Northern China*, *Sustainability* (2020), 12, 3464.
- [52] M.R. Trovato, F. Nocera, S. Giuffrida, *Life-Cycle Assessment and Monetary Measurements for the Carbon Footprint Reduction of Public Buildings*, *Sustainability* (2020), 12, 3460.

- [53] E. Lorenzo-Sáez, J.V. Oliver-Villanueva, E. Coll-Aliaga, L.G. Lemus-Zúñiga, V. Lerma-Arce, A. Reig-Fabado, *Energy Efficiency and GHG Emissions Mapping of Buildings for Decision-Making Processes against Climate Change at the Local Level*, *Sustainability* (20).
- [54] K. Nakano, M. Karube, N. Hattori, *Environmental Impacts of Building Construction Using Cross-laminated Timber Panel Construction Method: A Case of the Research Building in Kyushu, Japan*, *Sustainability* (2020), 12, 2220.
- [55] B. Cheng, J. Li, V.W.Y. Tam, M. Yang, D. Chen, *A BIM-LCA Approach for Estimating the Greenhouse Gas Emissions of Large-Scale Public Buildings: A Case Study*, *Sustainability* (2020), 12, 685.
- [56] X. Luo, C. Ma, J. Ge, *Evaluation Model and Strategy for Selecting Carbon Reduction Technology for Campus Buildings in Primary and Middle Schools in the Yangtze River Delta Region, China*, *Sustainability* (2020), 12, 534.
- [57] M. Iliescu, M. M. Roşu, D. Căpăţină, *Optimization of the Induction Process on Light Gauge Steel Profiles Used in Metallic Framed Sustainable Eco-Constructions*, *Sustainability* (2019), 11, 6686..
- [58] H. Duan, S. Zhang, S. Duan, W. Zhang, Z. Duan, S. Wang, J. Song, X. Wang, *Carbon Emissions Peak Prediction and the Reduction Pathway in Buildings during Operation in Jilin Province Based on LEAP*, *Sustainability* (2019), 11, 4540.
- [59] H. Y. Liu, *Sustainable Reuse of Military Facilities with a Carbon Inventory: Kinmen, Taiwan*, *Sustainability* (2019), 11, 1810.
- [60] X. Lin, J. Ren, J. Xu, T. Zheng, W. Cheng, J. Qiao, J. Huang, G. Li, *Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China*, *Sustainability* (2018), 10, 3978.
- [61] A. Padilla-Rivera, B. Amor, P. Blanchet, *Evaluating the Link between Low Carbon Reductions Strategies and Its Performance in the Context of Climate Change: A Carbon Footprint of a Wood-Frame Residential Building in Quebec, Canada*, *Sustainability* (2018), 1.
- [62] Y. Liang, D. Niu, W. Zhou, Y. Fan, *Decomposition Analysis of Carbon Emissions from Energy Consumption in Beijing-Tianjin-Hebei, China: A Weighted-Combination Model Based on Logarithmic Mean Divisia Index and Shapley Value*, *Sustainability* (2018), 10, 2535.
- [63] X. Yan, S. Cui, L. Xu, J. Lin, G. Ali, *Carbon Footprints of Urban Residential Buildings: A Household Survey-Based Approach*, *Sustainability* (2018), 10, 1131.
- [64] M. Hemmati, T. Messadi, H. Gu, *Life Cycle Assessment of Cross-Laminated Timber Transportation from Three Origin Points*, *Sustainability* (2022), 14, 336.
- [65] C.X. Chen, F. Pierobon, S. Jones, I. Maples, Y. Gong, I. Ganguly, *Comparative Life Cycle Assessment of Mass Timber and Concrete Residential Buildings: A Case Study in China*, *Sustainability* (2022), 14, 144.
- [66] H. Gu, S. Liang, F. Pierobon, M. Puettmann, I. Ganguly, C. Chen, R. Pasternack, M. Wishnie, S. Jones, I. Maples, *Mass Timber Building Life Cycle Assessment Methodology for the U.S. Regional Case Studies*, *Sustainability* (2021), 13, 14034..
- [67] C. Chen, Z. Zhao, J. Xiao, R. Tiong, *A Conceptual Framework for Estimating Building Embodied Carbon Based on Digital Twin Technology and Life Cycle Assessment*, *Sustainability* (2021), 13, 13875.

- [68] S. Giaveno, A. Osello, D. Garufi, D. Santamaria Razo, *Embodied Carbon and Embodied Energy Scenarios in the Built Environment. Computational Design Meets EPDs*, *Sustainability* (2021), 13, 11974.
- [69] A. Kumar, P. Singh, N.R. Kapoor, C.S. Meena, K. Jain, K.S. Kulkarni, R. Cozzolino, *Ecological Footprint of Residential Buildings in Composite Climate of India—A Case Study*, *Sustainability* (2021), 13, 11949.
- [70] C. Mileto, F. Vegas, C. Llatas, B. Soust-Verdaguer, *A Sustainable Approach for the Refurbishment Process of Vernacular Heritage: The Sesga House Case Study (Valencia, Spain)*, *Sustainability* (2021), 13, 9800.
- [71] J.P. Carvalho, F.S. Villaschi, L. Bragança, *Assessing Life Cycle Environmental and Economic Impacts of Building Construction Solutions with BIM*, *Sustainability* (2021), 13, 8914.
- [72] I. Vázquez-Rowe, C. Córdova-Arias, X. Brioso, S. Santa-Cruz, *A Method to Include Life Cycle Assessment Results in Choosing by Advantage (CBA) Multicriteria Decision Analysis. A Case Study for Seismic Retrofit in Peruvian Primary Schools*, *Sustainability* (2).
- [73] G. Mohebbi, A. Bahadori-Jahromi, M. Ferri, A. Mylona, *The Role of Embodied Carbon Databases in the Accuracy of Life Cycle Assessment (LCA) Calculations for the Embodied Carbon of Buildings*, *Sustainability* (2021), 13, 7988.
- [74] E. Baldoni, S. Coderoni, E. Di Giuseppe, M. D'Orazio, R. Esposti, G. Maracchini, *A Software Tool for a Stochastic Life Cycle Assessment and Costing of Buildings' Energy Efficiency Measures*, *Sustainability* (2021), 13, 7975.
- [75] S. Liang, H. Gu, R. Bergman, *Environmental Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis of a High-Rise Mass Timber Building: A Case Study in Pacific Northwestern United States*, *Sustainability* (2021), 13, 7831.
- [76] F. Dolezal, I. Dornigg, M. Wurm, H. Figl, *Overview and Main Findings for the Austrian Case Study*, *Sustainability* (2021), 13, 7584.
- [77] R. Giordano, F. Gallina, B. Quaglio, *Analysis and Assessment of the Building Life Cycle. Indicators and Tools for the Early Design Stage*, *Sustainability* (2021), 13, 6467.
- [78] P. Del Rosario, E. Palumbo, M. Traverso, *Environmental Product Declarations as Data Source for the Environmental Assessment of Buildings in the Context of Level(s) and DGNB: How Feasible Is Their Adoption?* *Sustainability* (2021), 13, 6143.
- [79] L.C. Malabi Eberhardt, A. van Stijn, L. Kristensen Stranddorf, M. Birkved, H. Birgisdottir, *Environmental Design Guidelines for Circular Building Components: The Case of the Circular Building Structure*, *Sustainability* (2021), 13, 5621.
- [80] N. Rajagopalan, S. Brancart, S. De Regel, A. Paduart, N.D. Temmerman, W. Debacker, *Multi-Criteria Decision Analysis Using Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in Circular Building Design: A Case Study for Wall Partitioning Systems in the Circular*.
- [81] P.F. Bianchi, V. Yepes, P.C. Jr. Vitorio, M. Kripka, *Study of Alternatives for the Design of Sustainable Low-Income Housing in Brazil*, *Sustainability* (2021), 13, 4757.
- [82] E. Baran, S. Czernik, M. Hynowski, B. Michałowski, M. Piasecki, J. Tomaszewska, J. Michalak, *Quantifying Environmental Burdens of Plasters Based on Natural vs. Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum*, *Sustainability* (2021), 13, 4298.

- [83] S. Lee, S. Tae, H. Jang, C.U. Chae, Y. Bok, *Development of Building Information Modeling Template for Environmental Impact Assessment*, *Sustainability* (2021), 13, 3092.
- [84] R. Kim, M.K. Lim, S. Roh, W.J. Park, *Analysis of the Characteristics of Environmental Impacts According to the Cut-Off Criteria Applicable to the Streamlined Life Cycle Assessment (S-LCA) of Apartment Buildings in South Korea*, *Sustainability* (2021), 13, 2.
- [85] V. Chandrasekaran, J. Dvarioniene, A. Vitkute, G. Gecevicius, *Environmental Impact Assessment of Renovated Multi-Apartment Building Using LCA Approach: Case Study from Lithuania*, *Sustainability* (2021), 13, 1542.
- [86] K. Kanafani, R. Kjær Zimmermann, F. Nygaard Rasmussen, H. Birgisdóttir, *Learnings from Developing a Context-Specific LCA Tool for Buildings—The Case of LCAbyg 4*, *Sustainability* (2021), 13, 1508.
- [87] M. Monzón-Chavarrías, S. Guillén-Lambea, S. García-Pérez, A.L. Montealegre-Gracia, J. Sierra-Pérez, *Heating Energy Consumption and Environmental Implications Due to the Change in Daily Habits in Residential Buildings Derived from COVID-19 Crisis: The Case*.
- [88] M. Abouhamad, M. Abu-Hamd, *Life Cycle Environmental Assessment of Light Steel Framed Buildings with Cement-Based Walls and Floors*, *Sustainability* (2020), 12, 10686.
- [89] S. Vilčeková, K. Harčárová, A. Moňoková, E.K. Burdová, *Life Cycle Assessment and Indoor Environmental Quality of Wooden Family Houses*, *Sustainability* (2020), 12, 10557.
- [90] M. Caruso, R. Pinho, F. Bianchi, F. Cavalieri, M.T. Lemmo, *A Life Cycle Framework for the Identification of Optimal Building Renovation Strategies Considering Economic and Environmental Impacts*, *Sustainability* (2020), 12, 10221..
- [91] V. Václavík, M. Ondová, T. Dvorský, A. Eštoková, M. Fabiánová, L. Gola, *Sustainability Potential Evaluation of Concrete with Steel Slag Aggregates by the LCA Method*, *Sustainability* (2020), 12, 9873.
- [92] S. Czernik, M. Marcinek, B. Michałowski, M. Piasecki, J. Tomaszewska, J. Michalak, *Environmental Footprint of Cementitious Adhesives—Components of ETICS*, *Sustainability* (2020), 12, 8998.
- [93] L. Ayagapin, J.P. Praene, *Environmental Overcost of Single Family Houses in Insular Context: A Comparative LCA Study of Reunion Island and France*, *Sustainability* (2020), 12, 8937.
- [94] M. Sinka, J. Zorica, D. Bajare, G. Sahmenko, A. Korjamins, *Fast Setting Binders for Application in 3D Printing of Bio-Based Building Materials*, *Sustainability* (2020), 12, 8838.
- [95] M. Ženišek, J. Pešta, M. Típka, V. Kočí, P. Hájek, *Optimization of RC Structures in Terms of Cost and Environmental Impact—Case Study*, *Sustainability* (2020), 12, 8532.
- [96] J.P. Carvalho, I. Alecrim, L. Bragança, R. Mateus, *Integrating BIM-Based LCA and Building Sustainability Assessment*, *Sustainability* (2020), 12, 7468.
- [97] E. Palumbo, B. Soust-Verdaguer, C. Llatas, M. Traverso, *How to Obtain Accurate Environmental Impacts at Early Design Stages in BIM When Using Environmental Product Declaration. A Method to Support Decision-Making*, *Sustainability* (2020), 12, 6927.
- [98] J. Veselka, M. Nehasilová, K. Dvořáková, P. Ryklová, M. Volf, J. Růžička, A. Lupíšek, *Recommendations for Developing a BIM for the Purpose of LCA in Green Building Certifications*, *Sustainability* (2020), 12, 6151.

- [99] J. A. Hafner, S. Slabik, M. Storck, *Urban Site Development as Temporal Carbon Storage—A Case Study in Germany*, *Sustainability* (2020), 12, 5827.
- [100] S. Theißen, J. Höper, J. Drzymalla, R. Wimmer, S. Markova, A. Meins-Becker, M. Lambertz, *Using Open BIM and IFC to Enable a Comprehensive Consideration of Building Services within a Whole-Building LCA*, *Sustainability* (2020), 12, 5644.
- [101] P. Mercader-Moyano, M. Ramos-Martín, *Comprehensive Sustainability Assessment of Regenerative Actions on the Thermal Envelope of Obsolete Buildings under Climate Change Perspective*, *Sustainability* (2020), 12, 5495.
- [102] Y.E. Valencia-Barba, J.M. Gómez-Soberón, M.C. Gómez-Soberón, F. López-Gayarre, *An Epitome of Building Floor Systems by Means of LCA Criteria*, *Sustainability* (2020), 12, 5442.
- [103] E. Kakkos, F. Heisel, D.E. Hebel, R. Hischer, *Towards Urban Mining—Estimating the Potential Environmental Benefits by Applying an Alternative Construction Practice. A Case Study from Switzerland*, *Sustainability* (2020), 12, 5041.
- [104] A. Naneva, M. Bonanomi, A. Hollberg, G. Habert, D. Hall, *Integrated BIM-Based LCA for the Entire Building Process Using an Existing Structure for Cost Estimation in the Swiss Context*, *Sustainability* (2020), 12, 3748.
- [105] I. Bertin, R. Mesnil, J.M. Jaeger, A. Feraille, R. Le Roy, *A BIM-Based Framework and Databank for Reusing Load-Bearing Structural Elements*, *Sustainability* (2020), 12, 3147.
- [106] P. Schneider-Marin, H. Harter, K. Tkachuk, W. Lang, *Uncertainty Analysis of Embedded Energy and Greenhouse Gas Emissions Using BIM in Early Design Stages*, *Sustainability* (2020), 12, 2633.
- [107] N. Wang, D. Satola, A. Houlihan Wiberg, C. Liu, A. Gustavsen, *Reduction Strategies for Greenhouse Gas Emissions from High-Speed Railway Station Buildings in a Cold Climate Zone of China*, *Sustainability* (2020), 12, 1704.
- [108] J. Pešta, T. Pavlů, K. Fořtová, V. Kočí, *Sustainable Masonry Made from Recycled Aggregates: LCA Case Study*, *Sustainability* (2020), 12, 1581.
- [109] E. Di Giuseppe, M. D'Orazio, G. Du, C. Favi, S. Lasvaux, G. Maracchini, P. Padey, *A Stochastic Approach to LCA of Internal Insulation Solutions for Historic Buildings*, *Sustainability* (2020), 12, 1535.
- [110] B. Cheng, J. Li, V.W.Y. Tam, M. Yang, D. Chen, *A BIM-LCA Approach for Estimating the Greenhouse Gas Emissions of Large-Scale Public Buildings: A Case Study*, *Sustainability* (2020), 12, 685.
- [111] Z. Xue, H. Liu, Q. Zhang, J. Wang, J. Fan, X. Zhou, *The Impact Assessment of Campus Buildings Based on a Life Cycle Assessment—Life Cycle Cost Integrated Model*, *Sustainability* (2020), 12, 294.
- [112] K. Lu, X. Jiang, V.W.Y. Tam, M. Li, H. Wang, B. Xia, Q. Chen, *Development of a Carbon Emissions Analysis Framework Using Building Information Modeling and Life Cycle Assessment for the Construction of Hospital Projects*, *Sustainability* (2019), 11, 6274.
- [113] T. Pavlů, V. Kočí, P. Hájek, *Environmental Assessment of Two Use Cycles of Recycled Aggregate Concrete*, *Sustainability* (2019), 11, 6185.
- [114] D. Pálenský, A. Lupíšek, *Carbon Benchmark for Czech Residential Buildings Based on Climate Goals Set by the Paris Agreement for 2030*, *Sustainability* (2019), 11, 6085.

- [115] S. Na, I. Paik, *Reducing Greenhouse Gas Emissions and Costs with the Alternative Structural System for Slab: A Comparative Analysis of South Korea Cases*, *Sustainability* (2019), 11, 5238.
- [116] I. Paik, S. Na, *Comparison of Carbon Dioxide Emissions of the Ordinary Reinforced Concrete Slab and the Voided Slab System During the Construction Stage: A Case Study of a Residential Building in South Korea*, *Sustainability* (2019), 11, 3571.
- [117] R.R.L. van Loon, E. Pujadas-Gispert, S.P.G. Moonen, R. Blok, *Environmental Optimization of Precast Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymers*, *Sustainability* (2019), 11, 2174.
- [118] D.C. Gámez-García, J.M. Gómez-Soberón, R. Corral-Higuera, H. Saldaña-Márquez, M.C. Gómez-Soberón, S.P. Arredondo-Rea, *A Cradle to Handover Life Cycle Assessment of External Walls: Choice of Materials and Prognosis of Elements*, *Sustainability* (2018), 10, 2.
- [119] J.A. Lozano-Miralles, M.J. Hermoso-Orzáez, C. Martínez-García, J.I. Rojas-Sola, *Comparative Study on the Environmental Impact of Traditional Clay Bricks Mixed with Organic Waste Using Life Cycle Analysis*, *Sustainability* (2018), 10, 2917.
- [120] M. Nikolić Topalović, M. Stanković, G. Čirović, D. Pamučar, *Comparison of the Applied Measures on the Simulated Scenarios for the Sustainable Building Construction through Carbon Footprint Emissions—Case Study of Building Construction in Serbia*, *Sustainab.*
- [121] J. Švajlenka, M. Kozlovská, T. Pošiváková, *Analysis of Selected Building Constructions Used in Industrial Construction in Terms of Sustainability Benefits*, *Sustainability* (2018), 10, 4394.
- [122] K. Feng, W. Lu, T. Olofsson, S. Chen, H. Yan, Y. Wang, *A Predictive Environmental Assessment Method for Construction Operations: Application to a Northeast China Case Study*, *Sustainability* (2018), 10, 3868.
- [123] C. Favi, E. Di Giuseppe, M. D'Orazio, M. Rossi, M. Germani, *Building Retrofit Measures and Design: A Probabilistic Approach for LCA*, *Sustainability* (2018), 10, 3655.
- [124] C. Skaar, N. Labonnote, K. Gradeci, *From Zero Emission Buildings (ZEB) to Zero Emission Neighbourhoods (ZEN): A Mapping Review of Algorithm-Based LCA*, *Sustainability* (2018), 10, 2405.
- [125] S. Roh, S. Tae, R. Kim, *Developing a Green Building Index (GBI) Certification System to Effectively Reduce Carbon Emissions in South Korea's Building Industry*, *Sustainability* (2018), 10, 1872.
- [126] H. Gervasio, S. Dimova, A. Pinto, *Benchmarking the Life-Cycle Environmental Performance of Buildings*, *Sustainability* (2018), 10, 1454.
- [127] L. Dong, Y. Wang, H.X. Li, B. Jiang, M. Al-Hussein, *Carbon Reduction Measures-Based LCA of Prefabricated Temporary Housing with Renewable Energy Systems*, *Sustainability* (2018), 10, 718.
- [128] M.K. Akyüz, O. Altuntaş, M.Z. Söğüt, *Economic and Environmental Optimization of an Airport Terminal Building's Wall and Roof Insulation*, *Sustainability* (2017), 9, 1849.
- [129] Y. Zhang, *Taking the Time Characteristic into Account of Life Cycle Assessment: Method and Application for Buildings*, *Sustainability* (2017), 9, 922.
- [130] J. Moreno-Juez, Iñigo J. Vegas, M. Frías Rojas, R. Vigil de la Villa, E. Guede-Vázquez, *Laboratory-scale study and semi-industrial validation of viability of inorganic CDW fine fractions as SCMs in blended cements*, *Construction and Building Materials*.

- [131] P. Sormunen, I. Deviatkin, M. Horttanainen, T. Kärki, An evaluation of thermoplastic composite fillers derived from construction and demolition waste based on their economic and environmental characteristics, *Journal of Cleaner Production*.
- [132] J. Fernandes, M. Peixoto, R. Mateus, H. Gervásio, Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks, *Journal of Cleaner Production*.
- [133] K. Rashid, A. Yazdanbakhsh, M. Ul Rehman, Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material, *Journal of Cleaner Production*.
- [134] X. Li, R. Yao, W. Yu, X. Meng, M. Liu, A. Short, B. Li, Low carbon heating and cooling of residential buildings in cities in the hot summer and cold winter zone - A bottom-up engineering stock modeling approach, *Journal of Cleaner Production*.
- [135] H. Li, Q. Deng, J. Zhang, B. Xia, M. Skitmore, Assessing the life cycle CO₂ emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China, *Journal of Cleaner Production*.
- [136] H. Nguyen, E. Adesanya, K. Ohenoja, L. Kriskova, Y. Pontikes, P. Kinnunen, M. Illikainen, Byproduct-based ettringite binder – A synergy between ladle slag and gypsum, *Construction and Building Materials*.
- [137] A. Charles, W. Maref, C.M. Ouellet-Plamondon, Case study of the upgrade of an existing office building for low energy consumption and low carbon emissions, *Energy and Buildings*.
- [138] G.B.M.A. Litjens, E. Worrell, W.G.J.H.M. van Sark, Lowering greenhouse gas emissions in the built environment by combining ground source heat pumps, photovoltaics and battery storage, *Energy and Buildings*.
- [139] K.T. Tong, R. Vinai, M.N. Soutsos, Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders, *Journal of Cleaner Production*.
- [140] S.C. Bostanci, M. Limbachiya, H. Kew, Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction, *Journal of Cleaner Production*.
- [141] B. D'Amico, F. Pomponi, Accuracy and reliability: A computational tool to minimise steel mass and carbon emissions at early-stage structural design, *Energy and Buildings*.
- [142] Adriana Souto-Martinez, Jay H. Arehart, Wil V. Srubar, Cradle-to-gate CO₂e emissions vs. in situ CO₂ sequestration of structural concrete elements, *Energy and Buildings*.
- [143] P. Ylmén, K. Mjörnell, J. Berlin, J. Arfvidsson, Approach to manage parameter and choice uncertainty in life cycle optimisation of building design: Case study of optimal insulation thickness, *Building and Environment*.
- [144] J. Li, S.T. Ng, M. Skitmore, Developing a decision aid for selecting low-carbon refurbishment solutions for multi-story residential buildings in subtropical cities, *Energy and Buildings*.
- [145] F. Molina-Moreno, J.V. Martí, V. Yepes, Carbon embodied optimization for buttressed earth-retaining walls: Implications for low-carbon conceptual designs, *Journal of Cleaner Production*.
- [146] K. Sartor, P. Dewallef, Exergy analysis applied to performance of buildings in Europe, *Energy and Buildings*.

- [147] A. Amiri, N. Emami, J. Ottelin, J. Sorvari, B. Marteinson, J. Heinonen, S. Junnila, *Embodied emissions of buildings - A forgotten factor in green building certificates*, *Energy and Buildings*.
- [148] P. Ylmén, K. Mjörnell, J. Berlin, J. Arfvidsson, *Approach to manage parameter and choice uncertainty in life cycle optimisation of building design: Case study of optimal insulation thickness*, *Building and Environment*.
- [149] E. Resch, I. Andresen, F. Cherubini, H. Brattebø, *Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources*, *Building and Environment*.
- [150] D. Muheise-Araalia, S. Pavia, *Properties of unfired, illitic-clay bricks for sustainable construction*, *Construction and Building Materials*.
- [151] A. Kosonen, A. Keskiisaari, *Zero-energy log house – Future concept for an energy efficient building in the Nordic conditions*, *Energy and Buildings*.
- [152] S. Muguda, G. Lucas, P.N. Hughes, C.E. Augarde, C. Perlot, A.W. Bruno, D. Gallipoli, *Durability and hygroscopic behaviour of biopolymer stabilised earthen construction materials*, *Construction and Building Materials*.
- [153] C. Piccardo, A. Dadoo, L. Gustavsson, *Retrofitting a building to passive house level: A life cycle carbon balance*, *Energy and Buildings*.
- [154] P. Moran, J. O'Connell, J. Goggins, *Sustainable energy efficiency retrofits as residential buildings move towards nearly zero energy building (NZEB) standards*, *Energy and Buildings*.
- [155] H. Nguyen, A. Kaas, P. Kinnunen, V. Carvelli, C. Monticelli, J. Yliniemi, M. Illikainen, *Fiber reinforced alkali-activated stone wool composites fabricated by hot-pressing technique*, *Materials & Design*.
- [156] E. Resch, C. Lausset, H. Brattebø, I. Andresen, *An analytical method for evaluating and visualizing embodied carbon emissions of buildings*, *Building and Environment*.
- [157] A.A. Morini, M.J. Ribeiro, D. Hotza, *Early-stage materials selection based on embodied energy and carbon footprint*, *Materials & Design*.
- [158] S. Eleftheriadis, P. Duffour, D. Mumovic, *BIM-embedded life cycle carbon assessment of RC buildings using optimised structural design alternatives*, *Energy and Buildings*.
- [159] C. Nägeli, C. Camarasa, M. Jakob, G. Catenazzi, Y. Ostermeyer, *Synthetic building stocks as a way to assess the energy demand and greenhouse gas emissions of national building stocks*, *Energy and Buildings*.
- [160] S. Eleftheriadis, P. Duffour, P. Greening, J. James, B. Stephenson, D. Mumovic, *Investigating relationships between cost and CO₂ emissions in reinforced concrete structures using a BIM-based design optimisation approach*, *Energy and Buildings*.
- [161] A. Feehan, H. Nagpal, A. Marvuglia, J. Gallagher, *Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes*, *Journal of Building Engineering*.
- [162] Y.E. Valencia-Barba, J.M. Gómez-Soberón, M.C. Gómez-Soberón, M.N. Rojas-Valencia, *Life cycle assessment of interior partition walls: Comparison between functionality requirements and best environmental performance*, *Journal of Building Engineering*.

- [163] M. Rabani, H. B. Madessa, M. Ljungström, L. Aamodt, S. Løvvold, N. Nord, *Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building*, *Building and Environment*.
- [164] M. Walbech Ryberg, P. Krogh Ohms, E. Møller, T. Lading, *Comparative life cycle assessment of four buildings in Greenland*, *Building and Environment*.
- [165] S.O. Amiandamhen, S. Adamopoulos, B. Adl-Zarrabi, H. Yin, J. Norén, *Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis*, *Construction and Building Ma*.
- [166] C. Piccardo, L. Gustavsson, *Implications of different modelling choices in primary energy and carbon emission analysis of buildings*, *Energy and Buildings*.
- [167] Z. Alwan, A. Nawarathna, R. Ayman, M. Zhu, Y. ElGhazi, *Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilising BIM*, *Journal of Building Engineering*.
- [168] V. Göswein, J. Dinis Silvestre, C. Sousa Monteiro, G. Habert, F. Freire, F. Pittau, *Influence of material choice, renovation rate, and electricity grid to achieve a Paris Agreement-compatible building stock: A Portuguese case study*, *Building and Environme*.
- [169] P. Ylmén, K. Mjörnell, J. Berlin, J. Arfvidsson, *Approach to manage parameter and choice uncertainty in life cycle optimisation of building design: Case study of optimal insulation thickness*, *Building and Environment*.
- [170] C. Lausselet, K.M. Lund, H. Brattebø, *LCA and scenario analysis of a Norwegian net-zero GHG emission neighbourhood: The importance of mobility and surplus energy from PV technologies*, *Building and Environment*.
- [171] C. Zhang, M. Hu, B. Laclau, T. Garnesson, X. Yang, C. Li, A. Tukker, *Environmental life cycle costing at the early stage for supporting cost optimization of precast concrete panel for energy renovation of existing buildings*, *Journal of Building Engineerin*.
- [172] D. Pinel, M. Korpås, K. B. Lindberg, *Impact of the CO₂ factor of electricity and the external CO₂ compensation price on zero emission neighborhoods' energy system design*, *Building and Environment*.
- [173] A. Galimshina, M. Moustapha, A. Hollberg, P. Padey, S. Lasvaux, B. Sudret, G. Habert, *Statistical method to identify robust building renovation choices for environmental and economic performance*, *Building and Environment*.
- [174] H. Nydahl, S. Andersson, A. P. Åstrand, T. Olofsson, *Including future climate induced cost when assessing building refurbishment performance*, *Energy and Buildings*.
- [175] M. Österbring, É. Mata, L. Thuvander, H. Wallbaum, *Explorative life-cycle assessment of renovating existing urban housing-stocks*, *Building and Environment*.
- [176] D. Birge, A. M. Berger, *Transitioning to low-carbon suburbs in hot-arid regions: A case-study of Emirati villas in Abu Dhabi*, *Building and Environment*.
- [177] M. Lavagna, C. Baldassarri, A. Campioli, S. Giorgi, A. Dalla Valle, V. Castellani, S. Sala, *Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock*, *Building and Environment*.

- [178] A. Koezjakov, D. Urge-Vorsatz, W. Crijns-Graus, M. van den Broek, *The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings*, *Energy and Buildings*.
- [179] A.U. Din, L. Brotas, *UK apartment construction impact on carbon life cycle calculations*, *Energy Procedia*.
- [180] C. Galpin, A. Moncaster, *Inclusion of on-site renewables in design-stage building life cycle assessments*, *Energy Procedia*.
- [181] M. Fufa, M. Inman, *A Parametric Tool for the Assessment of Operational Energy Use, Embodied Energy and Embodied Material Emissions in Building*, *Energy Procedia*.
- [182] L. Strömberg, *Verified Climate Calculation of Contractors' Design*, *Procedia Engineering*.
- [183] C. Favi, I. Meo, E. Di Giuseppe, M. Iannaccone, M. D'Orazio, M. Germani, *Towards a probabilistic approach in LCA of building retrofit measures*, *Energy Procedia*.
- [184] R.H. Crawford, X. Cadorel, *A Framework for Assessing the Environmental Benefits of Mass Timber Construction*, *Procedia Engineering*.
- [185] C. Colli, A. Bataille, E. Antczak, F. Buyle-Bodin, *Life Cycle Assessment of a French Single-Family House Refurbishment: The "Bat-Eco2" Case Study*, *Procedia CIRP*.
- [186] B. D'Amico, F. Pomponi, *Sustainability Tool to Optimise Material Quantities of Steel in the Construction Industry*, *Procedia CIRP*.
- [187] Z. Teshnizi, A. Pilon, S. Storey, D. Lopez, T. M. Froese, *Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia*, *Procedia CIRP*.
- [188] A. Himes, G. Busby, *Wood buildings as a climate solution*, *Developments in the Built Environment*.
- [189] H. Sözer, H. Sözen, *Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle*, *Energy Reports*.
- [190] M. Gangolells, K. Gaspar, M. Casals, J. Ferré-Bigorra, N. Forcada, M. Macarulla, *Life-cycle environmental and cost-effective energy retrofitting solutions for office stock*, *Sustainable Cities and Society*.
- [191] T. P. Obrecht, S. Jordan, A. Legat, M.R. Mendes Saade, A. Passer, *An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment*, *Journal of Cleaner Production*.
- [192] A. van Stijn, L.C. Malabi Eberhardt, B. Wouterszoon Jansen, A. Meijer, *A Circular Economy Life Cycle Assessment (CE-LCA) model for building components*, *Resources, Conservation and Recycling*.
- [193] M.F.F. Menna Barreto, J.F.G. Timm, A. Passuello, D.C.C. Dal Molin, J.R. Masuero, *Life cycle costs and impacts of massive slabs with varying concrete cover*, *Cleaner Engineering and Technology*.
- [194] A. González, C. Sendra, A. Herena, M. Rosquillas, D. Vaz, *Methodology to assess the circularity in building construction and refurbishment activities*, *Resources, Conservation & Recycling Advances*.

- [195] A. Loli, C. Bertolin, *Application of the Zero Emission Refurbishment method at a district scale*, *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- [196] Z. Alwan, A. Nawarathna, R. Ayman, M. Zhu, Y. ElGhazi, *Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilising BIM*, *Journal of Building Engineering*.
- [197] N. Ata-Ali, V. Penadés-Plà, D. Martínez-Muñoz, V. Yepes, *Recycled versus non-recycled insulation alternatives: LCA analysis for different climatic conditions in Spain*, *Resources, Conservation and Recycling*.
- [198] A. De Pascale, R. Arbolino, K. Szopik-Depczyńska, M. Limosani, G. Ioppolo, *A systematic review for measuring circular economy: the 61 indicators*, *J. Clean. Prod.*, 281 (2021).
- [199] K. Zhou, D. Bonet Fernandez, C. Wan, A. Denis, G. Juillard, K. Zhou, D. Bonet Fernandez, C. Wan, A. Denis, G. Juillard, *A study on circular economy implementation in China*.
- [200] J. Zhu, C. Fan, H. Shi, L. Shi, *Efforts for a circular economy in China: a comprehensive review of policies*, *J. Ind. Ecol.*, 23 (2019).
- [201] H. Wang, H. Schandl, X. Wang, F. Ma, Q. Yue, G. Wang, Y. Wang, Y. Wei, Z. Zhang, R. Zheng, *Measuring progress of China's circular economy*, *Resour. Conserv. Recycl.*
- [202] European Commission, *Closing the loop - an EU action plan for the circular economy*. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Brussels, 2.12.2015.
- [203] T. Domenech, B. Bahn-Walkowiak, *Transition towards a resource efficient circular economy in Europe: policy lessons from the EU and the member states*, *Ecol. Econ.*, 155 (2019).
- [204] Corporate report, *Committee on Climate Change's 2020 progress report: government response*, *Government response to the Committee on Climate Change's (CCC) 2020 progress report to Parliament*. From: Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Publ.
- [205] *Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della Pubblica Amministrazione ovvero Piano d'Azione Nazionale sul Green Public Procurement (PANGPP)- CRITERI AMBIENTALI MINIMI PER L'AFFIDAMENTO DEL SERVIZIO DI*.
- [206] *INTEGRATED NATIONAL ENERGY AND CLIMATE PLAN*, Ministry of Economic Development, Ministry of the Environment and Protection of Natural Resources and the Sea, Ministry of Infrastructure and Transport, December 2019.
- [207] *Epic Database*.
- [208] *INIES database*.
- [209] *ICE database*.
- [210] P. Crowther, *Design for disassembly to recover embodied energy*. In *Proceedings of the 16th Annual, Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Melbourne, Brisbane, Cairns, 22–24 September 1999.
- [211] J. Nassen, J. Holmberg, J.; A. Wadeskog, M. Nyman, *Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production stage of buildings: An input output analysis*, *Energy* (2007), 32, 1593–1602.

- [212] *The Embodied Carbon Review*, 2018, Bionova Ltd.
- [213] *Bringing embodied carbon upfront, Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*, World Green Building Council, September 2019.
- [214] A.U. Zaman, J. Arnott, K. McIntyre, J. Hannon, *Resource Harvesting through a Systematic Deconstruction of the Residential House: A Case Study of the 'Whole House Reuse' Project in Christchurch, New Zealand*, *Sustainability* (2018), 10, 3430.
- [215] R. Rovers, *Zero-energy and beyond: a paradigm shift in assessment*, *Buildings*, 5 (1) (2015).
- [216] P. P. E. F. F. Pomponi, «An investigation into GHG and non-GHG impacts of double skin façades in office refurbishments,» *J. Ind. Ecol.*, vol. 20, 2016.
- [217] L. Strain, *The Time Value of Carbon: Making the Case for the Importance of Embodied Carbon*, *Carbon Leadership Forum*.
- [218] Sicignano, E.; Di Ruocco, G.; Melella, R. *Mitigation Strategies for Reduction of Embodied Energy and Carbon, in the Construction Systems of Contemporary Quality Architecture*. *Sustainability* 2019, 11, 3806. <https://doi.org/10.3390/su11143806>.
- [219] UNI 8290-1:1981. *Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Classificazione e terminologia*.
- [220] *Elenco europeo dei rifiuti. Decisione della Commissione del 18 dicembre 2014*.
- [221] *Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008*.
- [222] *PROGRESS 2017-2020. Final report*.
- [223] UNI 11277:2008. *Sostenibilità in edilizia - Esigenze e requisiti di eco compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione*.
- [224] *Fattore di emissione per la produzione ed il consumo di elettricità in Italia*. ISPRA.
- [225] *Fattore di emissioni per la produzione ed il consumo di Diesel. GHG information for transport services*.
- [226] *SICURNET.2. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti pubblici. Consiglio superiore dei lavori pubblici. Servizio tecnico centrale*.
- [227] *Guidelines for storage and handling BlueScope's Steel's products*.
- [228] *Valutazione del ciclo di vita (LCA) per l'acciaio zincato a caldo*. American Galvanizers Association.
- [229] *Wood Program in Architecture and Construction - Aalto University*.
- [230] Helmut C. Schultz, Werner Sobek, Karl J. Habermann, traduzione di Orsetta Barbero Lenti, Luca Trentini, Norman Winkler, *Atlante dell'acciaio*, UTET.
- [231] Julius Natterer, Thomas Herzog, Michael Volz, *Atlante del Legno*, UTET.
- [232] Zevi L., *Il nuovissimo Manuale dell'architetto*, Mancosu Editore.
- [233] Giordano G., *Tecnica delle costruzioni in legno*, Milano, Hoepli, 1999.
- [234] Leite F.L., *BIM for Design Coordination A Virtual Design & Construction Guide for Designers, General Contractors, & MEP Subcontractors (Building Information Modeling)*, Wiley, 2020.

- [235] LA GESTIONE DELLA DEMOLIZIONE SELETTIVA E Di Ruocco G., Melella R., Correale D., Sorano L.G., SMALTIMENTO MATERIALI DI RISULTA, IN UN INTERVENTO DI SOSTITUZIONE EDILIZIA IN PROVINCIA DI SALERNO, Colloqui.AT.e 2019 Ingegno e costruzione nell'epoca della complessità, edizioni Politecnico di Torino.
- [236] Naish C., *London 2012 legacy: transformation of the Olympic Park*, *Civil Engineering*, Volume 167 Issue 6 2014.
- [237] Tzourmakliotou D., *Designing for Deconstruction—The Related Factors*, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 15 (2021) 459-468.
- [238] Smil V., *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*. N.p., Lulu.com, 2016..
- [239] Giacometti A., *Il pianeta grigio*, *Il Tascabile* 2020.
- [240] Barcella G., *Canapa e calce. Tra tradizione e innovazione dalla bioedilizia alla neosedilizia*. Italia, Dario Flaccovio Editore, 2021..
- [241] 6° Report *Edilizia in legno*, Angelo Luigi Marchetti, Assolegno 2021.