

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

In
Architettura Tecnica

**Rigenerazione del patrimonio residenziale del dopoguerra.
Analisi comparativa LCA ed energetica di edifici di nuova
costruzione a telaio in cemento armato con tamponamenti in
laterizio e in calcestruzzo aerato autoclavato**

CANDIDATO:

Edoardo Nasi

RELATORE:

Chiar.ma Prof. Cecilia Mazzoli

CORRELATORE:

Ing. Carlo Costantino

Anno Accademico 2025-2026

Sessione III

Abstract	6
1. Inquadramento della ricerca	7
1.1 Analisi patrimonio edilizio	7
1.2 Limiti e carenze prestazionali	9
1.3 Obiettivi della ricerca	9
2. Paradigma d'intervento	10
2.1 La modalità d'intervento: demolizione con ricostruzione	10
2.2 Strategie d'intervento per la rigenerazione	11
2.3 Sistemi costruttivi pesanti e sistemi leggeri	15
2.4 Tecnologia costruttiva analizzata	17
2.4.1 Tamponamento con blocchi di laterizio rettificato	18
2.4.2 Tamponamento con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	20
3. Metodo d'analisi e strumenti utilizzati	23
3.1 Analisi energetica	25
3.1.1 Modellazione Energetica in Edilclima EC700	25
3.1.2 Fasi operative EdilClima EC700	26
3.2 Analisi impatto ambientale	28
3.2.1 Definizione LCA	29
3.2.2 Fasi operative LCA	31
4. Applicazione al caso di studio: analisi e progetto	32
4.1 Analisi stato di fatto	32
4.2 Requisiti progettuali e demografici	35
4.3 Masterplan	37
4.4 Progettazione degli edifici	40
4.5 Analisi energetica	48
4.6 Analisi di impatto ambientale	60
4.6.1 Confronto tra componenti dell'edificio	65
4.7 Confronto tra sistemi con e senza integrazione impiantistica	69
4.7.1 Sistema con tamponamento blocchi di laterizio rettificato	70
4.7.2 Sistema con tamponamento blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	74

4.8 Confronto tra sistemi senza integrazione impiantistica	78
5. Conclusioni	85
Bibliografia generale	89

Abstract

Il lavoro di tesi affronta il tema della trasformazione del patrimonio residenziale italiano del dopoguerra, caratterizzato da diffuse carenze energetiche, strutturali e prestazionali. Lo studio si inserisce nel più ampio dibattito riguardante le strategie di rigenerazione urbana e il confronto tra interventi di riqualificazione e quelli di demolizione con ricostruzione. L'obiettivo è valutare, attraverso un'analisi comparativa, gli impatti ambientali ed energetici associati a edifici di nuova costruzione, realizzati previa demolizione dei fabbricati esistenti, costituiti da un telaio in cemento armato completato da due differenti sistemi di tamponamento: blocchi di laterizio rettificato e blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato (tipo Ytong).

L'indagine seleziona come caso studio un isolato della prima periferia di Bologna, rappresentativo dell'edilizia residenziale del periodo 1940–1965. Dopo una analisi approfondita dello stato di fatto e una valutazione delle prestazioni energetiche tramite modellazione con EdilClima, è stata svolta un'analisi Life Cycle Assessment (LCA) sviluppata mediante One Click LCA, considerando tutte le fasi del ciclo di vita.

I risultati mostrano come gli interventi di riqualificazione garantiscano benefici ridotti rispetto a soluzioni più invasive e che la demolizione con ricostruzione, se accompagnata dalla scelta di sistemi costruttivi volti alla riduzione dell'impatto ambientale e di sistemi impiantistici alimentati da fonti rinnovabili, consenta una significativa riduzione del Global Warming Potential e dell'energia primaria nel lungo periodo. Il confronto tra laterizio rettificato e calcestruzzo aerato autoclavato evidenzia, infine, differenze rilevanti in termini di prestazioni energetiche, massa termica e impatti ambientali.

La ricerca conferma il potenziale della demolizione con ricostruzione come strategia efficace nei contesti edilizi obsoleti, contribuendo agli obiettivi di decarbonizzazione e di rigenerazione urbana.

1. Inquadramento della ricerca

Nel panorama globale, il 2019 ha segnato il massimo storico delle emissioni di CO₂ legate alle attività edilizie. Il settore delle costruzioni da solo incide per circa il 28% sul totale mondiale, a cui va aggiunto un ulteriore 10% derivante dalla produzione dei materiali impiegati. Anche in Europa il quadro non è diverso: l'edilizia continua a esercitare un forte impatto energetico, produttivo e sull'uso del territorio, confermandosi uno dei comparti più impattanti dal punto di vista ambientale. [1]

In questo contesto, è urgente identificare e individuare strategie attuabili per la rigenerazione urbana. Le aree urbane sono responsabili di un impatto ambientale significativo e, a partire dal 2007, la popolazione urbana mondiale ha superato quella rurale, infatti, già nel 2018 il 55% della popolazione viveva in aree urbane. Nonostante le aree urbane occupino una parte molto piccola della superficie terrestre (1-3%), si prevede che entro il 2050 consumeranno oltre il 75% delle risorse naturali, produrranno il 50% dei rifiuti globali e oltre il 60% delle emissioni di gas serra. Quindi identificare e applicare azioni prioritarie nelle aree urbane è essenziale per arrivare ad un cambiamento.[2]

Da queste premesse, si sviluppa la proposta progettuale che cerca di comprendere quali siano le migliori strategie per intervenire sul patrimonio edilizio esistente. La strategia di rigenerazione che questo studio intende approfondire prevede la demolizione con ricostruzione. In particolare, verranno analizzati due scenari di ricostruzione basati entrambi sull'adozione di una tecnologia costruttiva tradizionale pesante e puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato, completati da tamponamenti differenti: in un caso, blocchi di laterizio rettificato, nell'altro, blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato (del tipo Ytong). L'obiettivo è analizzare gli scenari per individuare le strategie che rispondono maggiormente ai criteri di circolarità, in termini di ridotto impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita, di contenimento dei consumi energetici e di utilizzo di fonti di energia rinnovabile.

1.1 Analisi patrimonio edilizio

Per cominciare questo studio è necessario focalizzarsi sullo stato del patrimonio edilizio presente in Italia, in particolare sul vasto comparto edilizio realizzato in Italia nella seconda metà del Novecento, periodo di massima crescita urbanistica

successivo alla Seconda Guerra Mondiale. L'attenzione si concentra soprattutto sugli edifici a destinazione residenziale, che rappresentano la maggior parte del costruito esistente. La maggioranza di questi edifici non soddisfa gli attuali requisiti di prestazione energetica e si presta dunque sia a interventi di riqualificazione profonda, sia a operazioni di demolizione e ricostruzione, offrendo un notevole margine di trasformazione sul territorio nazionale, senza vincoli legati alla tutela dei beni culturali [2].

In questo contesto, l'impegno a introdurre strategie che riducano l'impronta ambientale del comparto delle costruzioni, soprattutto per quanto riguarda gli edifici residenziali, rappresenta un elemento chiave del percorso di transizione ecologica verso un'economia circolare e la neutralità climatica. Infatti, il costruito contribuisce in modo significativo ai consumi energetici e alle emissioni: gli edifici presenti nelle città sono responsabili di circa il 40% dell'energia utilizzata nell'UE e del 36% delle emissioni di gas serra connesse all'uso dell'energia, generate ad esempio durante le fasi operative. [1]

Per quanto riguarda il territorio del Comune di Bologna, i dati resi disponibili dall'ISTAT nell'ultimo censimento della popolazione e delle abitazioni permettono di evidenziare alcune tendenze, tra cui quella secondo la quale a livello nazionale prevale un tessuto edilizio diffuso e di piccole dimensioni, in cui la maggior parte delle abitazioni è situato all'interno di edifici plurifamiliari nelle aree urbane. Il patrimonio residenziale bolognese risulta invece distribuito in maniera quasi uniforme tra gli edifici costruiti prima del 1945 e quelli realizzati tra il 1946 e il 1970.

Se si scende più nello specifico della composizione delle città italiane di dimensioni medio-grandi, si può vedere come prevalgono edifici residenziali a blocco lineare, generalmente sviluppati su cinque o sei piani, con profondità comprese tra 9 e 12 metri e strutture realizzate in cemento armato oppure in muratura portante. La distribuzione interna prevede solitamente da due a quattro alloggi per piano, organizzati attorno a un unico corpo scala, per un totale complessivo di circa 20–30 unità abitative. [3]

1.2 Limiti e carenze prestazionali

Gli edifici realizzati nella seconda metà del Novecento precedono l'introduzione delle diverse normative su sicurezza strutturale e sismica, prevenzione incendi, efficienza energetica, pianificazione urbanistica e requisiti di accessibilità. Una parte consistente del patrimonio residenziale italiano risale infatti al periodo della ricostruzione del dopoguerra e alla forte espansione abitativa legata al boom economico, quando si costruiva velocemente per rispondere alla crescente domanda di alloggi. Di conseguenza, la maggioranza degli edifici di quell'epoca presenta oggi importanti carenze sia dal punto di vista della sicurezza sismica sia sotto il profilo dell'efficienza energetica. In particolare, nonostante i notevoli cambiamenti riguardanti le tecniche di costruzione, come il passaggio dalle murature portanti ai telai in calcestruzzo armato, non si sono verificati miglioramenti dal punto di vista dei consumi energetici tra il periodo prima e quello dopo la guerra. Per i motivi appena illustrati questa tipologia di lotti, costituisce pertanto l'area con il più alto potenziale di trasformazione per il rilevante effetto che la rigenerazione può produrre sul contesto urbano. [3]

1.3 Obiettivi della ricerca

La seguente ricerca ha lo scopo di approfondire e analizzare l'impatto ambientale di diversi sistemi di tamponamento all'interno di un sistema costruttivo pesante. L'obiettivo principale dello studio consiste nell'analizzare gli scenari studiati per ricavare i dati necessari ad effettuare una discussione critica, oltre a stabilire il sistema meno impattante dal punto di vista ambientale, sulla base dei criteri utilizzati per il confronto.

Per raggiungere tale finalità, la ricerca si è articolata in diversi passaggi. In primo luogo, è stata effettuata una raccolta accurata dei dati relativi agli edifici esistenti, comprendente informazioni di tipo costruttivo, funzionale ed energetico, al fine di ottenere un quadro completo e dettagliato dello stato di fatto.

La fase successiva ha riguardato l'applicazione di metodologie analitiche appropriate, in grado di fornire risultati quantitativi e qualitativi affidabili, utili alle valutazioni di impatto energetico e ambientale. Infine, sulla base dei risultati ottenuti, sono stati

elaborati i confronti relativi ai diversi scenari analizzati. Attraverso questa impostazione, lo studio intende fornire un contributo concreto e significativo alla conoscenza di questo settore, proponendo strumenti e riflessioni utili per una gestione più consapevole ed efficace delle problematiche analizzate.

2. Paradigma d'intervento

2.1 La modalità d'intervento: demolizione con ricostruzione

In questo elaborato di tesi si esaminerà una modalità di intervento nello specifico, la demolizione con ricostruzione. Negli ultimi vent'anni, in Italia, le misure di incentivazione hanno determinato un incremento degli investimenti rivolti agli edifici esistenti, superando quelli destinati alle nuove costruzioni. Per rispettare gli obiettivi europei di riduzione delle emissioni di gas serra, risulta infatti necessario intervenire in modo consistente su ampie parti del patrimonio residenziale. Come indicato dal rapporto ENEA 2021 e dal PNIEC 2020-2030, il tasso teorico di riqualificazione della superficie abitativa dovrebbe collocarsi tra lo 0,88% e l'1,16%, in funzione dello scenario considerato. Nonostante ciò, l'effettiva incidenza degli interventi, pur sostenuti da normative stringenti e da importanti agevolazioni fiscali, è rimasta modesta, fermandosi allo 0,42% dell'intera superficie residenziale. Di conseguenza, è stato conseguito meno della metà del risultato atteso. In questo quadro, la sola riqualificazione energetica rischia quindi di non essere sufficiente per raggiungere la neutralità climatica. [3]

In tale contesto, alcune ricerche svolte tra il 2019 e il 2024 dal gruppo di ricerca di Architettura Tecnica dell'Università di Bologna si sono focalizzate sullo studio di un approccio basato sulla ricostruzione del patrimonio, definito "Ricostruire per Rigenerare" (R4R). [3] Questo si configura come una strategia di lungo periodo rivolta al patrimonio edilizio esistente, con l'obiettivo di promuovere la rigenerazione urbana e accompagnare la transizione ecologica. Tale approccio definisce programmi e linee guida per il rinnovamento delle aree urbane, orientando la pianificazione verso criteri di sostenibilità e integrando valutazioni ambientali e analisi LCA su vasta scala grazie alle potenzialità offerte dagli strumenti digitali. Il modello R4R è destinato principalmente alle prime periferie, dove si concentrano gli edifici più

obsoleti, realizzati nel secondo dopoguerra in assenza di un quadro normativo di riferimento.

A differenza degli interventi di efficientamento energetico tradizionali, come l'aggiunta di sistemi isolanti, la sostituzione di serramenti ad alte prestazioni o l'adozione di impianti avanzati, R4R promuove azioni più incisive. In particolare, sostiene la demolizione e ricostruzione del patrimonio residenziale non vincolato, edificato nelle città italiane soprattutto durante la fase di massima espansione urbanistica, tra la prima e la seconda metà del Novecento. Si tratta di edifici datati e caratterizzati da carenze strutturali ed energetiche riconducibili ai metodi costruttivi dell'epoca, i cui effetti si manifestano con evidenza nel tempo. Tali criticità risultano difficilmente risolvibili e gli interventi prospettati negli scenari di riqualificazione, recupero o rinnovamento spesso si rivelano non sostenibili, né dal punto di vista economico né in termini di ottimizzazione tecnico-ingegneristica. [3]

2.2 Strategie d'intervento per la rigenerazione

Quando si analizza un edificio esistente, ci sono tre potenziali scenari:

- conservazione dell'edificio
- riqualificazione energetica
- demolizione e ricostruzione

Per dimostrare quanto appena detto riguardo alla demolizione si fa riferimento ad uno studio compiuto dall'Università di Bologna nel quale viene valutato e confrontato l'impatto ambientale del ciclo di vita dell'edificio per ciascuno scenario. Per fare ciò viene utilizzato il metodo di valutazione LCA, articolato in moduli distinti che corrispondono alle varie fasi del ciclo di vita dell'edificio. Il consumo energetico durante la fase d'uso (B1–B7) costituisce generalmente la componente con il maggiore impatto ambientale, incidendo, secondo la letteratura, tra il 60% e il 90% sul totale. È comunque necessario considerare anche il peso dell'impatto derivante dalla produzione dei materiali da costruzione, comprendente le attività di estrazione, trasporto e trasformazione. Per gli edifici di nuova realizzazione, il percorso operativo della LCA analizza l'intero ciclo di vita, dalla fabbricazione dei materiali fino alla

gestione finale dei rifiuti. [3]

Tutti gli scenari considerati mostrano una riduzione significativa dell'impatto ambientale degli edifici esistenti, anche includendo l'ipotesi di demolizione e successiva ricostruzione al termine del periodo di analisi preso in considerazione dallo studio (30 anni). Gli interventi minori, come l'isolamento della copertura (-11,08%), la sostituzione degli infissi (-3,55%) o l'installazione di pannelli fotovoltaici (-10,20%), producono benefici più contenuti rispetto agli interventi che coinvolgono l'intero involucro edilizio, i quali registrano riduzioni comprese tra -42,73% e -50,21%. Gli scenari più performanti in tutti i parametri analizzati risultano però essere la demolizione e ricostruzione (-74,51%), seguiti dalla ristrutturazione profonda (-50,21%) [3]. Infatti, se si guardano le simulazioni LCA si può notare che, su periodi temporali estesi, la ricostruzione (R) risulta più vantaggiosa rispetto alla conservazione (C) e alla ristrutturazione profonda (DR), a condizione che vengano impiegati materiali circolari e soluzioni costruttive in grado di ridurre al minimo l'Embodied Carbon (EC) e l'Embodied Energy (EE), oltre a contenere gli impatti legati alla fase operativa. Nel medio periodo, la ristrutturazione profonda continua a essere più conveniente della ricostruzione, ma tale vantaggio non si mantiene nel lungo periodo, poiché l'aumento degli EC e degli EE impedisce il raggiungimento dell'obiettivo delle emissioni nette pari a zero. [2]

Se si considera il breve periodo, la ricostruzione risulta comunque più favorevole della conservazione in termini di GWP (Global Warming Potential), cioè quanta CO₂ equivalente viene generata dall'emissione di un gas serra, e supera la conservazione anche per il consumo di EP (Primary Energy), cioè l'energia primaria, a partire dal medio termine. (Grafici 1- 2) La ristrutturazione profonda, invece, è più performante della conservazione sia per GWP sia per PE in tutti periodi temporali analizzati: breve, medio e lungo termine. Infine, nel lungo periodo la ricostruzione risulta più vantaggiosa della ristrutturazione profonda rispetto al GWP e anche nel medio periodo la differenza tra i due scenari risulta relativamente contenuta. [2]

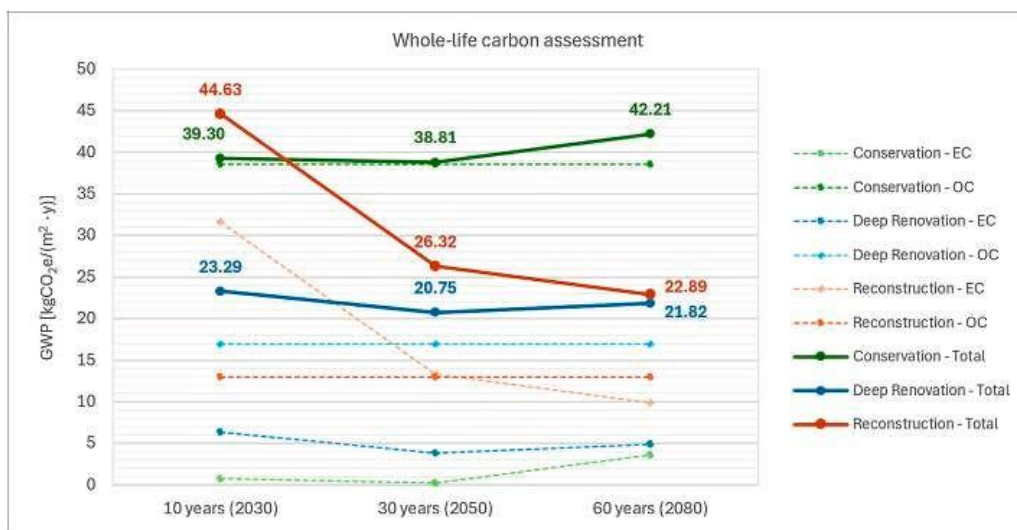


Grafico 1: Whole life carbon assessment per gli scenari di intervento C, DR, R per 10, 30 e 60 anni [2]

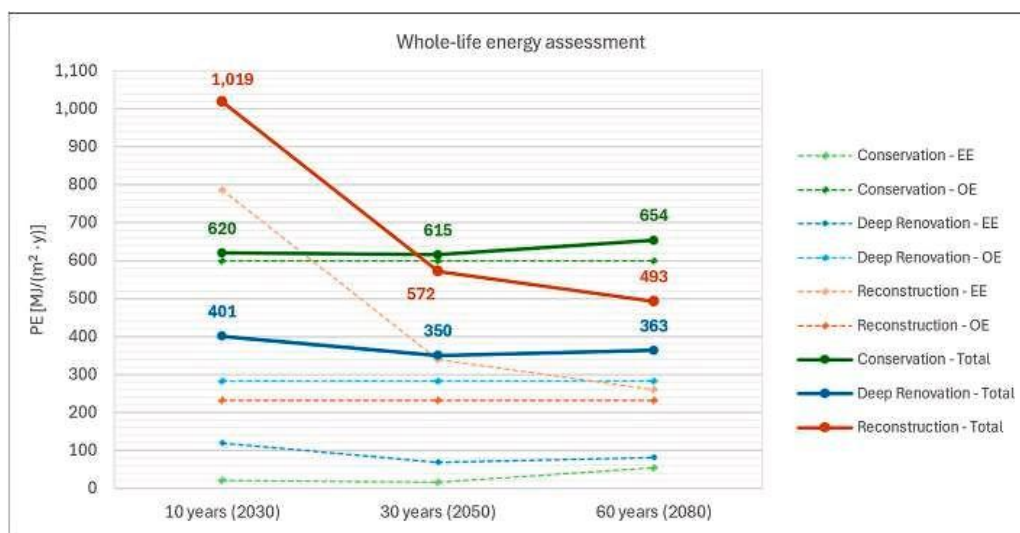


Grafico 2: Whole life carbon assessment per gli scenari di intervento C, DR, R per 10, 30 e 60 anni [2]

In conclusione, lo scenario di ricostruzione previsto dalla strategia R4R rappresenta un'opzione efficace quando applicato a edifici esistenti realizzati in assenza di normative su efficienza energetica e sicurezza sismica, come nel caso analizzato. Gli interventi più limitati, tipici delle ristrutturazioni parziali, sono molto diffusi ma, pur garantendo un notevole miglioramento delle prestazioni energetiche, non affrontano gli aspetti legati alla sicurezza strutturale e trascurano la selezione dei materiali. Queste operazioni prolungano la vita utile degli edifici, ma non risultano coerenti con gli obiettivi di decarbonizzazione nel lungo periodo, per questo motivo intervenire

subito con la sostituzione, anziché rinviare la demolizione nel tempo, risulta ambientalmente più sostenibile. [2]

Un'altra argomentazione a supporto della scelta del processo di demolizione e ricostruzione deriva dal fenomeno della desigillazione. Questo concetto consiste nella rimozione delle superfici impermeabili e nel ripristino del profilo naturale del suolo, attraverso l'allentamento degli strati compattati e la rimozione di materiali estranei. Intervenire su aree sigillate consente di recuperare la capacità infiltrativa, riattivare funzioni ecologiche e favorire la creazione di nuove superfici verdi. Questi interventi permettono di mitigare allagamenti, contenere le temperature urbane, migliorare la salute pubblica e ricostituire connessioni ecologiche. È dimostrato che il verde urbano può abbassare la temperatura dell'aria fino a 6 °C, contribuendo significativamente alla qualità microclimatica. [16]

Il recupero della permeabilità dei suoli è un passaggio essenziale per aumentare la resilienza urbana ai cambiamenti climatici, migliorando al contempo qualità, comfort e vivibilità degli spazi aperti. Per questo, in linea con l'obiettivo europeo "no net land take 2050", le politiche urbane promuovono l'inclusione di strategie di deimpermeabilizzazione nei processi di pianificazione. [17]

Il quadro nazionale mostra però come la sigillazione del suolo rappresenti una delle principali criticità ambientali nelle città italiane, dove oltre 21.500 km² di territorio risultano impermeabilizzati e il consumo di suolo continua a crescere a ritmi elevati. Le aree urbane e soprattutto le periferie, sviluppatasi con una forte espansione edilizia nel secondo dopoguerra, presentano i livelli più alti di copertura artificiale, con conseguenze misurabili sull'aumento delle temperature superficiali e sull'aggravarsi del rischio idrogeologico. I dati ISPRA mostrano come nei margini urbani la pressione sul suolo sia particolarmente intensa, con superfici sigillate che impediscono infiltrazione, regolazione termica e rigenerazione ecologica. [18]

In questo contesto, la desigillazione ottenuta tramite demolizione e ricostruzione selettiva rappresenta una strategia efficace per rigenerare lotti urbani obsoleti. La rimozione di edifici o pavimentazioni inutilmente impermeabili permette di restituire permeabilità, aumentare la resilienza idraulica e creare spazi più socialmente fruibili. Integrando nuova edificazione più compatta, standard energetici elevati e superfici verdi o drenanti, è possibile sostituire gli edifici inefficienti del dopoguerra migliorando

al contempo la qualità ambientale complessiva. In questo modo, la demolizione mirata diventa uno strumento per coniugare rigenerazione edilizia e riequilibrio ecologico.

2.3 Sistemi costruttivi pesanti e sistemi leggeri

La scelta del sistema costruttivo rappresenta un aspetto fondamentale nella progettazione degli edifici, in quanto influenza non solo le caratteristiche strutturali e prestazionali, ma anche la durabilità e gli aspetti energetici, ambientali e di comfort interno. Per questi motivi si propone un'analisi comparativa tra i due principali approcci costruttivi adottati nel settore edilizio: i sistemi pesanti, caratterizzati dall'impiego prevalente di materiali massivi come calcestruzzo e muratura; i sistemi leggeri, che fanno uso di strutture prefabbricate, assemblate a secco e materiali a bassa densità come acciaio, legno o pannelli prefabbricati.

Partendo dagli aspetti ambientali e dal comfort interno e facendo riferimento ad uno studio effettuato dall'Università di Bologna, si può vedere come le strutture pesanti offrano, in media, una temperatura operativa interna più bassa di circa 1 °C rispetto alle soluzioni costruttive leggere. [4] L'osservazione dei grafici annuali evidenzia chiaramente l'effetto dell'inerzia termica nel contenere le oscillazioni della temperatura interna dovute ai cambiamenti stagionali, contribuendo così al mantenimento del comfort abitativo.

In particolare, gli edifici pesanti tendono a conservare valori più contenuti passando dall'inverno all'estate, mentre nella transizione estiva-invernale mantengono temperature leggermente più elevate. Questo comportamento dimostra l'importanza della massa termica come strumento passivo per la qualità del comfort interno; tale capacità permette così di ridurre l'utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffrescamento.

Durante la stagione estiva, queste tecniche costruttive assicurano un numero più ampio di ore di comfort. L'analisi del benessere termico conferma infatti che i sistemi di costruzione pesanti raggiungono una quota maggiore di ore in condizioni di comfort rispetto alle alternative leggere. c

Dal punto di vista dei costi di costruzione invece si può vedere come ci sia di nuovo una differenza in base alla durata del periodo di calcolo e del tipo di sistema costruttivo. Se si considera un orizzonte di calcolo di 30 anni, i costi iniziali incidono molto più delle spese di utilizzo. Le soluzioni costruttive pesanti risultano economicamente più vantaggiose, mentre quelle leggere sono più costose pur avendo un valore residuo maggiore. Nella LCA invece, le strutture leggere mostrano un GWP inferiore, ma registrano impatti più elevati negli altri indicatori, in particolare nel consumo di energia primaria

Con un periodo di 60 anni, la fase operativa acquista un peso maggiore, con manutenzioni e sostituzioni che incidono notevolmente, mentre il valore residuo diminuisce. Il sistema pesante resta ancora l'opzione più economica. In questo scenario, il divario di GWP tra sistemi pesanti e leggeri si riduce, mentre le differenze negli altri indicatori rimangono stabili o aumentano a causa della maggiore incidenza di manutenzione e sostituzioni.

Infine, con un periodo di 100 anni, il valore residuo si annulla e le differenze economiche tra le tipologie costruttive aumentano. Il GWP tende a convergere tra i diversi sistemi, mentre l'incidenza della manutenzione cresce ulteriormente. Per gli altri indicatori ambientali, i sistemi pesanti mantengono prestazioni migliori, conferendo loro un vantaggio complessivo, soprattutto considerando la minore durabilità delle costruzioni leggere. [4]

Quindi per concludere, nonostante gli edifici realizzati con tecniche leggere presentino un valore residuo più alto, questo vantaggio non è sufficiente a compensare i maggiori costi iniziali. Di conseguenza, in ciascuno degli orizzonti temporali considerati (30, 60 e 100 anni), i sistemi costruttivi pesanti mostrano un costo di ciclo di vita complessivamente più basso.

Per il presente lavoro di tesi è stata scelta una struttura pesante realizzata con telaio in conglomerato cementizio armato e tamponamenti "a umido" di varia natura, che rappresenta una tipologia costruttiva molto diffusa a livello internazionale. La sua ampia adozione è legata a diversi elementi: costi più contenuti rispetto ad altre soluzioni, facilità di reperimento dei materiali, rapidità e semplicità di esecuzione, buona resistenza nel tempo anche in presenza di condizioni climatiche avverse e possibilità di adattare il sistema a edifici e strutture diverse.

Un ulteriore aspetto che ne favorisce la presenza in aree a clima caldo come quelle

mediterranee è l'elevata inerzia termica dei materiali impiegati. La maggiore massa, infatti, contribuisce a garantire un comfort termico migliore rispetto alle tecniche leggere, se valutati nel lungo periodo. Numerose ricerche indicano inoltre che i sistemi costruttivi pesanti presentano spesso impatti ambientali più contenuti rispetto alle alternative leggere. [4] Tali analisi sottolineano come la fase d'uso dell'edificio sia determinante nel definire i risultati complessivi, poiché può generare differenze significative tra i vari scenari valutati.

2.4 Tecnologia costruttiva analizzata

Per la composizione degli edifici, come detto in precedenza, è stato scelto un sistema costruttivo pesante, costituito da un telaio in calcestruzzo armato, completato da due diverse tipologie di tamponamento: i blocchi di laterizio rettificato e i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato.

Questa tipologia, dal punto di vista meccanico, garantisce una elevata resistenza sia a trazione che a compressione e una buona durabilità nel tempo associata ad una manutenzione relativamente ridotta. Inoltre, grazie alla massa del calcestruzzo, gli edifici hanno una buona inerzia termica.

Per quanto riguarda il materiale, il calcestruzzo è molto pesante e ha una alta densità; il suo comportamento è fragile e rigido e ha tempi di realizzazione abbastanza lunghi legati alle fasi di getto e maturazione del calcestruzzo all'interno delle casseforme. Inoltre, come vedremo più avanti, ha un notevole impatto ambientale dovuto sia all'elevato consumo di energia e materiali per il trasporto sia alle emissioni di CO₂ dovute alla produzione del cemento.

Infine, riguardo ai solai, in tutti gli edifici sono stati utilizzati solai in latero-cemento, sia per la versione con i blocchi di laterizio rettificato sia per quella con i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato. Questa tipologia è composta da travetti in calcestruzzo armato, pignatte di laterizio rettificato come alleggerimenti e una soletta in calcestruzzo. È una soluzione conveniente grazie ai costi dei materiali e alla semplicità della posa in opera. Inoltre, il solaio ha un comportamento strutturale efficace per luci medio-piccole.

Sotto il profilo energetico, la presenza delle pignatte di laterizio rettificato, unita ad adeguati strati di isolante, contribuisce ad aumentare la massa termica del solaio,

che consente una buona inerzia termica complessiva. L'elemento più critico dal punto di vista ambientale è dato dal calcestruzzo armato e dalla sua produzione che implica una notevole produzione di CO₂ e dispendio di energia.

2.4.1 Tamponamento con blocchi di laterizio rettificato

Per la realizzazione dello scenario con le strutture realizzate con blocchi di laterizio rettificato sono stati scelti i blocchi della gamma Porotherm della Wienerberger. (Figure 1 e 2)

Il Sistema Porotherm rappresenta un'evoluzione del tradizionale laterizio rettificato, concepito per realizzare edifici ad alta efficienza energetica, elevato comfort abitativo e ottima durabilità. Il sistema si basa sull'impiego dei blocchi rettificati Porotherm BIO PLAN, caratterizzati da superfici perfettamente planari che consentono la posa con giunti di malta sottili di appena 1 mm, eliminando il ponte termico tra i corsi e migliorando sensibilmente le prestazioni termiche della muratura. [5]



Figure 1-2: Blocchi di laterizio rettificato [5]

Per questo studio, a livello di progettazione sono stati selezionati diversi spessori per le diverse tipologie di muri presenti negli edifici. In particolare sono stati scelti blocchi da 30 cm di spessore per le pareti portanti esterne ed interne, come i vani scala e i muri di separazione tra le unità abitative. Per i muri all'interno dei singoli appartamenti invece sono stati utilizzati blocchi da 20 cm e blocchi da 12,5 cm per i tramezzi.

La muratura con blocchi di laterizio rettificato presenta diversi aspetti positivi. Tra i principali vantaggi vi sono la semplicità strutturale del sistema costruttivo e le buone prestazioni di isolamento termico e acustico degli ambienti interni. Inoltre, grazie all'utilizzo di materiali pesanti e molto resistenti, gli edifici realizzati con questa tecnica possono raggiungere una durabilità molto elevata.

Tuttavia, questo sistema comporta anche alcune limitazioni. Dal punto di vista strutturale, la muratura portante mostra scarsa capacità di resistere alle sollecitazioni orizzontali, poiché il collegamento tra pareti e solai non garantisce un comportamento sufficientemente solidale. A ciò si aggiunge l'impossibilità di ottenere piante completamente libere ai vari piani, poiché la distribuzione interna è condizionata dalla presenza dei muri portanti. Le dimensioni significative delle pareti impongono inoltre aperture di luce ridotta, limitando la libertà progettuale.

Un altro svantaggio rilevante riguarda l'altezza massima raggiungibile: con i mattoni utilizzati come elementi strutturali, il numero di piani costruibili è contenuto. Per sopperire a questi svantaggi, nelle costruzioni moderne si ricorre prevalentemente a telai in calcestruzzo armato, utilizzando i mattoni soltanto per realizzare i tamponamenti. Questa soluzione consente maggiore flessibilità nella progettazione e distribuzione interna degli ambienti, e permette di realizzare edifici con geometrie e dimensioni più libere. [5]

Trattandosi di un sistema costruttivo pesante, le murature di laterizio rettificato sono dure e stabili meccanicamente; ciononostante come vedremo successivamente, presentano una maggiore sensibilità agli agenti esterni, soprattutto all'umidità e agli sbalzi termici, rispetto ai blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato. La manutenzione riguarda principalmente i giunti in malta e gli strati di finitura, che sono il punto più vulnerabile della muratura e che possono manifestare erosioni, distacchi o fessurazioni nel tempo. Nello specifico la loro manutenzione consiste principalmente nel reintegro o sigillatura dei giunti e nella verifica della loro continuità.

Spessore	cm	30
Lunghezza	cm	25
Altezza	cm	24,9
Peso del blocco	kg	15,8
Foratura	% <	55
Densità media	Kg/mc	850

Tabella 1: Caratteristiche blocco di laterizio rettificato per muratura esterna [5]

Spessore	cm	20
Lunghezza	cm	29
Altezza	cm	19,9
Peso del blocco	kg	11,0
Foratura	% <	45
Densità media	Kg/mc	950

Tabella 2: Caratteristiche blocco di laterizio rettificato per muratura interna [5]

Spessore	cm	12,5
Lunghezza	cm	29
Altezza	cm	19,9
Peso del blocco	kg	7,2
Foratura	% <	45
Densità media	Kg/mc	1000

Tabella 3: Caratteristiche blocco di laterizio rettificato per tramezzo [5]

2.4.2 Tamponamento con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato

Per la realizzazione dello scenario con le strutture realizzate con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato (AAC) sono stati scelti quelli del marchio Ytong (Figure 3-4). si tratta di un materiale ad alte prestazioni , brevettato e introdotto nel mercato edilizio negli anni '20, ottenuto mediante la lavorazione di una miscela di sabbia silicea, calce, cemento e acqua, integrata con un agente aerante. Durante il processo di autoclavazione si sviluppa una struttura omogenea composta da una fitta rete di micro pori uniformemente distribuiti, che conferisce al materiale le sue principali proprietà fisico-meccaniche. [6]

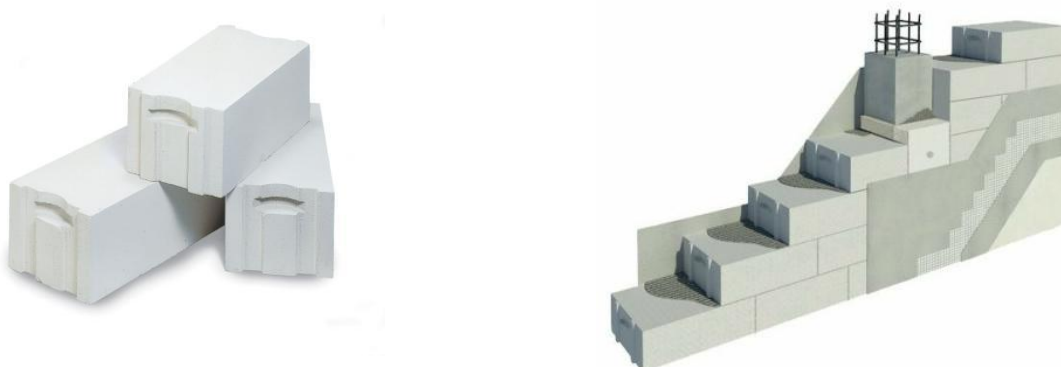


Figure 3-4: Blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato [6]

Il blocco di calcestruzzo aerato autoclavato si distingue, oltre che per la sua elevata versatilità, anche per la grande facilità di lavorazione e posa in opera poiché è leggero e rapido da assemblare. I singoli elementi possono essere tagliati o sagomati con semplicità, permettendo un adattamento rapido alle esigenze del cantiere. La posa dei blocchi avviene tramite giunti sottili di malta, tutto questo consente una notevole velocità di costruzione, che può generare significativi risparmi economici, soprattutto negli interventi più grandi. Nel complesso, i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato combinano leggerezza, isolamento termico, traspirabilità e resistenza al fuoco, offrendo un materiale performante, sostenibile e adatto alle esigenze dell'edilizia contemporanea. [6] Anche nel caso del calcestruzzo aerato autoclavato, a livello di progettazione sono stati selezionati diversi spessori per i vari muri che compongono egli edifici. In particolare, sono stati scelti blocchi da 30 cm di spessore per le pareti portanti esterne ed interne, come i vani scala e i muri di separazione tra le unità abitative. Per i muri all'interno dei singoli appartamenti sono stati utilizzati blocchi da 20 cm e per i tramezzi blocchi da 12 cm .

Dal punto di vista fisico, il calcestruzzo aerato autoclavato presenta una densità compresa tra 300 e 600 kg/m³ che è un valore significativamente inferiore rispetto ai materiali da muratura tradizionali. Questa leggerezza deriva dall'elevata porosità interna, che contribuisce anche alle ottime prestazioni di isolamento. La conducibilità termica si colloca infatti in un intervallo molto favorevole, variando tra 0,045 e 0,16 W/mK a seconda della classe di densità del blocco: questo permette di ottenere murature altamente prestazionali dal punto di vista energetico, con valori di trasmittanza ridotti anche senza l'impiego di ulteriori materiali isolanti.

Il materiale presenta una notevole durabilità, grazie alla natura completamente minerale e all'assenza di componenti organiche soggette a degradazione. I blocchi resistono all'umidità, al gelo e ai cicli di gelo-disgelo, mantenendo stabili le proprie caratteristiche nel tempo. [6] Per questi motivi generalmente ha ridotte esigenze di manutenzione rispetto a molte soluzioni tradizionali. Infatti, i blocchi non sono soggetti a marcescenza, non vengono attaccati da insetti o microrganismi e non subiscono alterazioni significative nel tempo in condizioni di normale esercizio. Per tali motivi, il materiale strutturale non richiede interventi di manutenzione ordinaria, né trattamenti protettivi specifici nel corso della vita utile dell'edificio.

Dal punto di vista meccanico, i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato raggiungono resistenze a compressione comprese tra 2,0 e 4,0 N/mm², rendendoli idonei sia per murature portanti che per tamponamenti leggeri. Nonostante la massa ridotta, il materiale mantiene una buona resistenza agli urti e consente fissaggi sicuri, risultando quindi adatto anche in contesti di normale uso residenziale. Un ulteriore vantaggio del calcestruzzo aerato autoclavato è la sua elevata traspirabilità, dovuta alla diffusività della struttura porosa. Questo favorisce la regolazione dell'umidità interna degli ambienti e contribuisce alla salubrità degli edifici, limitando fenomeni di condensa superficiale e di formazione di muffe. [6] Quindi essendo un materiale poroso e igroscopico capace di assorbire acqua in presenza di esposizione prolungata, l'umidità persistente può anche influire negativamente sulle prestazioni della muratura. La manutenzione preventiva risulta così necessaria per la verifica periodica di tali elementi e nel tempestivo ripristino di eventuali discontinuità o danneggiamenti, evitando infiltrazioni prolungate.

Dimensioni	Lunghezza	mm	624		
	Altezza		249 ¹⁾		
<i>Stabilimento di POE (I)</i>	Larghezza		300	400	
Categoria di tolleranza TLMB		mm	Lung. ± 1,5	Alt. ± 1,0	Larg. ± 1,5
Configurazione blocco		-	LISCIO		
Peso blocco a secco		kg	16,4	21,9	
Consumo malta collante FIX N202		kg/m ²	7,0	9,2	
Consumo malta ancorante FIX B202 sp. 2cm		kg/m	10,2	13,6	

Tabella 4: Caratteristiche blocco di calcestruzzo aerato autoclavato per muratura esterna [6]

Dimensioni	Lunghezza	mm	624					
	Altezza		249					
<i>Stabilimento di POE (I)</i>	Larghezza		50	80	100	120	150	200
Categoria di tolleranza TLMB		mm	Lung. ± 1,5		Alt. ± 1,0		Larg. ± 1,5	
Configurazione blocco		Liscio	X	X	X			
		Maschiato		X	X	X	X	X
Peso blocco a secco		kg	3,9	6,3	7,8	9,4	11,7	15,6
Consumo malta collante FIX N202		kg/m ²	L	1,1	1,8	2,2	-	-
			M	-	1,2	1,5	1,8	2,3
Consumo malta ancorante FIX B202 sp. 2cm		kg/m	1,7	2,8	3,4	4,1	5,1	6,8

Tabella 5: Caratteristiche blocco di calcestruzzo aerato autoclavato per muratura interna e tramezzi [6]

3. Metodo d'analisi e strumenti utilizzati

Dopo aver analizzato la tipologia d'intervento e i sistemi costruttivi che verranno utilizzati per la realizzazione del progetto, si è passati alla fase operativa, quindi al progetto vero e proprio.

Come primo passo, è stato necessario raccogliere tutto il materiale relativo agli edifici inclusi nell'isolato urbano, in modo da analizzare il contesto di intervento allo stato di fatto. A ciascun edificio, infatti, è stata associata la relativa pratica edilizia, laddove possibile, in quanto non sempre erano presenti le pratiche sul portale. Una volta completata l'associazione corretta delle pratiche, si è proceduto con un'analisi approfondita di ciascun fascicolo per ricavare il maggior numero di informazioni sull'edificio. La ricerca è iniziata dallo studio di piante e sezioni, utile a formulare ipotesi sul sistema costruttivo e sulle stratigrafie di pareti e solai. Successivamente, sono state calcolate le superfici di estensione delle unità abitative, individuate le tipologie di alloggi e conteggiate le camere, così da stimare il potenziale numero di abitanti. Terminata questa fase, l'insieme dei dati raccolti è stato elaborato per restituire una visione completa e coerente dell'intero isolato esistente. Questi numeri sono necessari per creare una base di partenza sulla quale dimensionare i nuovi volumi, rispettando le normative vigenti.

Tutta questa ricerca è stata effettuata utilizzando e combinando le informazioni trovate tramite il portale online sullo stato delle pratiche amministrative del Comune di Bologna e il sito Open Data. [19]

La fase seguente ha riguardato lo sviluppo di un metaprogetto per la ricostruzione dell'isolato urbano: tenendo in considerazione i requisiti progettuali e demografici, si è arrivati alla declinazione di un masterplan basato sui numeri trovati nella ricerca precedente. È stato un processo iterativo perché era importante che tutti i parametri fossero rispettati; quindi è stato opportuno procedere per ipotesi, verifiche e successivi aggiornamenti, per trovare la soluzione che corrispondesse alla distribuzione idonea per la realizzazione di un comparto di nuova edificazione che senza ridurre il numero di alloggi, presenti una superficie permeabile maggiore rispetto allo stato di fatto. In sintesi, si è giunti a una configurazione che prevede 4 edifici pluripiano a corte aperta, con sagoma leggermente diversa tra una coppia e

l'altra.

Dopo la fase di progettazione a scala urbana e architettonica, ha seguito la progettazione tecnologica riguardante la definizione della maglia strutturale e delle differenti stratigrafie di involucro. Sono stati scelti i materiali, con i relativi spessori, da accostare ai due diversi tamponamenti selezionati, oggetto d'analisi e comparazione; per i solai, le finestre e le porte, invece si è scelto di adottare una versione univoca per entrambi i sistemi.

Tutte queste scelte progettuali sono state recepite all'interno di modelli digitali realizzati per entrambi gli edifici tipo a corte aperta, per costituire così il modello 3D dell'intero isolato. Per le fasi successive di studio, è stato considerato uno solo degli edifici, assunto come edificio di riferimento su cui effettuare tutte le analisi. L'obiettivo di questa scelta è semplificare il processo di studio degli impatti energetici attraverso un modello parametrico che possa essere adattabile e replicabile, con le dovute semplificazioni e personalizzazioni, all'intero comparto di edifici.

A partire dal modello 3D dell'edificio, è stata avviata la fase di verifica delle sue prestazioni energetiche tramite l'uso del software EdilClima EC700. Nel paragrafo successivo viene infatti illustrata tutta la procedura seguita per verificare che le prestazioni energetiche fossero idonee ai requisiti richiesti dalle normative vigenti. Questa fase è stata fondamentale per poter controllare la rispondenza delle prestazioni termiche delle stratigrafie progettate ai requisiti normativi vigenti. Una volta verificate le stratigrafie di involucro si è proceduto con la valutazione degli impatti ambientali dei sistemi costruttivi, tramite svolgimento di analisi LCA.

Questa fase, che viene descritta in maniera dettagliata nei paragrafi successivi, rappresenta la sezione fondamentale di questo studio poiché racchiude il calcolo dei parametri significativi ai fini della stima degli impatti ambientali degli interventi. Per effettuare questa analisi è stato usato OneClick LCA, software nato per valutare l'impatto ambientale di edifici, infrastrutture o prodotti durante tutto il loro ciclo di vita, dalla produzione dei materiali fino alla demolizione o al riciclo. I risultati ottenuti da questo software sono stati infine confrontati tra loro per trovare le differenze tra i due sistemi costruttivi usati.

3.1 Analisi energetica

Il primo passaggio importante all'interno della metodologia utilizzata è l'analisi energetica, questa è un procedimento tecnico finalizzato a valutare dettagliatamente le prestazioni energetiche di un edificio, tenendo conto dell'involucro, degli impianti e delle condizioni di esercizio.

L'analisi richiede innanzitutto la raccolta dei dati geometrici dell'edificio: orientamento, superfici disperdenti, volumi riscaldati, suddivisione in zone termiche. A questi si aggiungono le informazioni relative alle strutture opache, come pareti, solai e coperture, descritte tramite stratigrafie, con spessori e proprietà dei materiali, dalle quali si ricavano i valori di trasmittanza termica. Vengono inoltre inserite le caratteristiche dei serramenti, comprese trasmittanze, fattori solari e schermature mobili, e infine i ponti termici presenti nell'edificio.

Una parte fondamentale dell'analisi riguarda la descrizione dei sistemi impiantistici, le prestazioni degli impianti vengono valutate considerando i rendimenti di generazione, distribuzione, emissione e regolazione, nonché l'efficienza stagionale del sistema.

Sulla base dei dati raccolti, l'analisi determina il fabbisogno energetico per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione. Nel caso studio, questo lavoro è stato svolto tramite il software EdilClima che ha elaborato un modello energetico dettagliato dell'edificio, calcolato le dispersioni termiche e determinato l'energia effettivamente richiesta agli impianti.

Il risultato finale è quindi la prestazione energetica globale dell'edificio con tutte le verifiche richieste dalla normativa. In sintesi, l'analisi energetica costituisce uno strumento indispensabile per comprendere il comportamento energetico dell'edificio e definire strategie progettuali e di riqualificazione basate su dati oggettivi e conformi alla normativa. [9]

3.1.1 Modellazione Energetica in Edilclima EC700

EdilClima è un software italiano specializzato nell'analisi della prestazione energetica degli edifici e dei sistemi impiantistici, attraverso la modellazione dell'edificio stesso. Al suo interno il software che è stato usato per questo progetto è l'EC700 che

permette di eseguire il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici secondo le norme tecniche italiane (UNI/TS 11300) e metodo dinamico orario (UNI EN ISO 52016-1), integrando al suo interno: la modellazione geometrica dell'edificio, la definizione dei carichi termici e la valutazione dei fabbisogni energetici.

3.1.2 Fasi operative EdilClima EC700

Per quanto riguarda il suo utilizzo, la prima fase è stata quindi quella di inserimento dei dati ambientali della zona nella quale è collocato il lotto. Dopodiché sono stati creati tutti i componenti dell'involucro dell'edificio, sotto forma di stratigrafie, di tutte le tipologie di muri e pavimenti, con la scelta degli spessori e dei materiali idonei per rispettare i valori di trasmittanza.

Per il sistema coi blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato, le tipologie di muri sono state mantenute le stesse ma cambiando la stratigrafia: per quanto riguarda i muri interni è stato semplicemente sostituito il blocco di laterizio rettificato con quello di calcestruzzo aerato autoclavato; nel muro esterno invece, oltre al cambio del blocco, è stato anche tolto lo strato di materiale isolante, per via delle diverse proprietà del calcestruzzo aerato autoclavato rispetto al laterizio.

Infine le stratigrafie dei solai sono state utilizzate per entrambe le tipologie di tamponamento per cui sono uguali e oltre a questi pacchetti sono stati modellati e inseriti gli infissi esterni ed interni, cioè le porte e le finestre.

Sempre all'interno di questa fase relativa ai componenti dell'edificio, sono stati configurati i ponti termici della struttura. Anche in questo caso sono stati utilizzati gli stessi tra blocchi di laterizio rettificato e blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato.

Il passo successivo è stato quello della modellazione grafica dell'edificio, quindi partendo dalle piante del piano terra e del piano tipo sono stati inseriti i vari elementi dell'involucro creati in precedenza (Figura 5). Dopo aver creato l'intero edificio, un passaggio importante è stato quello riguardante la distinzione dei locali climatizzati, utili così a differenziare i vari ambienti dell'edificio e individuare quali siano da conteggiare per i calcoli. In questa ricerca non sono stati inseriti elementi del

contesto urbano attorno all'edificio (alberi, altri edifici, ecc.) poiché non erano indispensabili ai fini delle analisi che sono state effettuate.

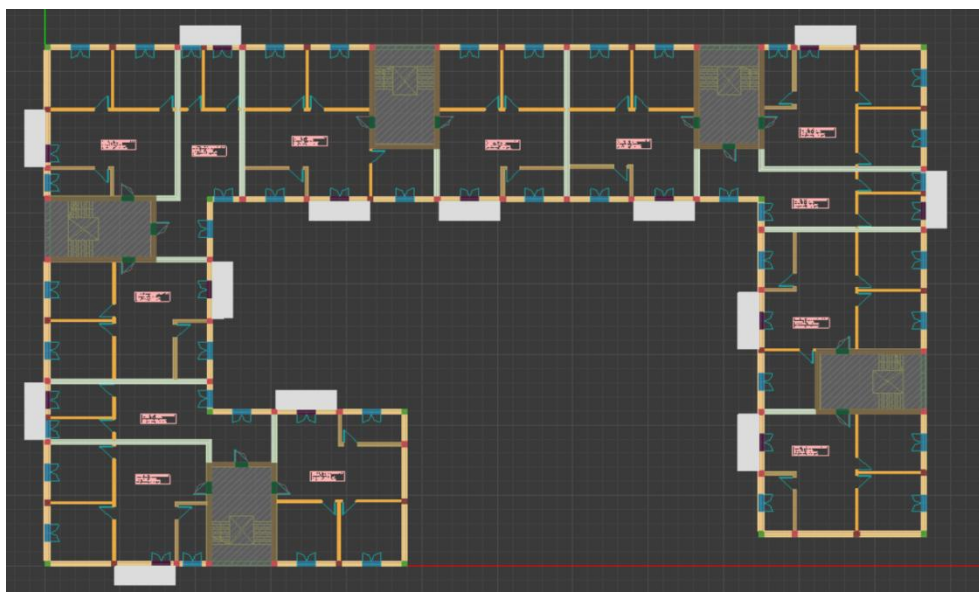


Figura 5: Schermata di modellazione EdilClima - elaborazione dell'autore

Una volta creata la struttura sono stati scelti gli impianti di riscaldamento e acqua calda, di raffrescamento, e di solare fotovoltaico selezionando le tipologie e i modelli in base al fabbisogno energetico necessario per ogni impianto.

Per il riscaldamento e l'acqua calda è stata scelta una pompa di calore elettrica aria-acqua, cioè un sistema che utilizza l'aria esterna come fonte di energia e trasferisce il calore all'acqua dell'impianto domestico. La pompa di calore nello specifico, è stata scelta in modo tale che con la propria potenza utile potesse sopperire alla potenza nominale emessa dai corpi riscaldati, quindi dai vari ambienti climatizzati dell'edificio. Per il raffrescamento viene utilizzata la stessa pompa di calore scelta per il riscaldamento, poiché è reversibile, questo vuol dire che può invertire il proprio ciclo di funzionamento. In inverno estrae calore dall'aria esterna e lo trasferisce all'interno dell'edificio, mentre in estate svolge il processo opposto: preleva calore dagli ambienti interni e lo disperde verso l'esterno, producendo così raffrescamento.

Per il solare e fotovoltaico sono stati posizionati sulla copertura 417 pannelli che coprono così un'area di 665 m² e sopperiscono ad una parte del fabbisogno complessivo dell'edificio. Tutti questi impianti sono stati scelti sia per la versione col

tamponamento in blocchi di laterizio rettificato sia per quella con i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato.

Infine, dopo aver così creato tutto l'edificio, sono state eseguite le verifiche di legge, secondo il DM del 26.06.15 e il D. Lgs 08.11.21 n. 199/2021, tramite le quali si certifica la conformità dell'impianto, attestandone la sicurezza, l'efficienza energetica e il corretto funzionamento. Come visto prima, anche tutti questi passaggi finali di verifica sono stati eseguiti sia per il sistema costruttivo con i blocchi di laterizio rettificato sia per quello con i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato, ottenendo esito positivo per tutte le verifiche.

3.2 Analisi impatto ambientale

La seconda procedura importante della metodologia utilizzata in questa ricerca è l'analisi dell'impatto ambientale. Questo tipo di analisi, applicata al settore edilizio, rappresenta uno degli strumenti fondamentali per valutare in modo oggettivo e quantitativo gli effetti che un edificio, un materiale o un sistema costruttivo generano sull'ambiente durante il loro intero ciclo di vita. Questa tipologia di analisi assume oggi un ruolo centrale nel processo progettuale, in quanto consente di identificare le fasi più critiche dal punto di vista ambientale e di orientare le scelte tecniche verso soluzioni più sostenibili.

Il metodo di riferimento per condurre un'analisi di impatto ambientale in edilizia è il Life Cycle Assessment (LCA). L'approccio LCA permette di considerare tutte le fasi del ciclo di vita di un edificio. Tale visione globale consente di evitare analisi parziali limitate alla sola fase operativa e di valutare anche il cosiddetto carbonio incorporato, ovvero l'impatto associato alle fasi di produzione e fine vita dei materiali.

Nella pratica progettuale, le analisi LCA vengono spesso condotte tramite software dedicati, tra cui One Click LCA, il quale è molto utilizzato nel settore edilizio grazie alla presenza di banche dati aggiornate (EPD, database europei) e alla possibilità di analizzare rapidamente gli impatti per componente, fase e scenario progettuale. L'adozione diffusa della metodologia LCA e l'utilizzo di strumenti digitali avanzati rappresentano oggi un passaggio essenziale verso edifici realmente a basso impatto e verso il raggiungimento degli obiettivi globali di decarbonizzazione.

3.2.1 Definizione LCA

Lo strumento LCA, che in italiano si traduce con Valutazione del Ciclo di Vita, serve quindi a calcolare la percentuale di circolarità dei materiali all'inizio del ciclo di vita dell'edificio secondo la norma ISO 59020, cioè gli impatti ambientali dell'edificio durante il corso della sua vita. Attraverso questo tipo di analisi è così possibile guidare le decisioni durante il progetto.

L'analisi si divide in varie fasi, corrispondenti alle fasi di vita dell'edificio:

- Produzione (A1 – A3),
- Costruzione (A4 – A5),
- Utilizzo (B1 – B7),
- Fine vita (C1 -C4);
- Riutilizzo/recupero/riciclo (D)

Una volta effettuata l'analisi, i risultati vengono forniti attraverso una serie di indicatori che descrivono l'impatto ambientale dei materiali. Gli indicatori sono:

- Global Warming Potential (GWP): è l'indicatore che quantifica il contributo di un gas al riscaldamento globale. L'effetto che ciascun gas serra esercita dipende sia dalla quantità presente in atmosfera sia dalla sua efficacia nel trattenere l'energia termica. Questo parametro è stato introdotto per rendere possibile il confronto tra diversi gas serra, facendo il rapporto tra la loro capacità di generare riscaldamento e quella dell'anidride carbonica.

- Ozone Depletion Potential, ODP: esprime la capacità di una sostanza di distruggere lo strato di ozono presente nella stratosfera, il quale svolge una funzione protettiva fondamentale contro le radiazioni ultraviolette e dei raggi X provenienti dal Sole.

- Acidification Potential, AP: questo processo si verifica attraverso la conversione degli inquinanti presenti nell'atmosfera in composti acidi, che successivamente, tramite le precipitazioni, raggiungono il suolo e i corpi idrici.

- Eutrophication Potential, EP: Indica l'aumento della concentrazione di nutrienti all'interno di uno specifico ambiente.

- Photochemical Ozone Creation Potential, POCP: rappresenta l'eccesso di ozono sulla superficie terrestre, in questo contesto l'ozono ha un comportamento altamente corrosivo

- Abiotic Depletion Potential, ADP: indica la diminuzione delle materie prime non rinnovabili a livello globale

All'interno dell'analisi è presente anche una sezione riguardante l'utilizzo di energia primaria e di acqua, che viene descritta attraverso degli ulteriori criteri d'analisi:

- Utilizzo di risorse energetiche primarie rinnovabili come materie prime, PERE-f; è la quantità di risorse rinnovabili utilizzate come materie prime e non come energia.

- Utilizzo totale di energia primaria, escluse materie prime, PEtot: è l'energia primaria totale consumata escludendo le risorse usate come materia prima.

- Utilizzo totale di energia primaria rinnovabile, PERE: è l'energia primaria proveniente da fonti rinnovabili consumata nel ciclo di vita (solare, eolica, idrica, biomassa).

- Utilizzo totale di energia primaria non rinnovabile, PENRE: è l'energia primaria proveniente da fonti non rinnovabili (gas, petrolio, carbone, uranio).

- Utilizzo netto di acqua dolce, FW: rappresenta il volume di acqua dolce effettivamente consumata durante il ciclo di vita.

Un'analisi del ciclo di vita condotta in maniera completa prende in considerazione tutte le fasi che caratterizzano la vita utile. Nel campo delle costruzioni, questa metodologia può essere applicata a più livelli, dal prodotto edilizio al sistema costruttivo, fino all'intero edificio. Nel caso di studio analizzato, l'approccio LCA è riferito all'intero edificio, con l'obiettivo di confrontare tra loro i diversi sistemi costruttivi. Il punteggio finale di Building Circularity rappresenta la circolarità totale dei materiali sia nell'uso dei materiali per il progetto che nella movimentazione alla fine

della vita utile. È calcolato quindi come la media dei materiali recuperati (cioè l'uso di materiali circolari nel progetto) e dei materiali restituiti (che rappresenta l'efficacia con cui i materiali vengono restituiti, invece di essere smaltiti o declassati in valore). [10]

3.2.2 Fasi operative LCA

Nel software Oneclick LCA il primo passaggio, come su Edilclima, è stato quello di inserire la localizzazione del lotto e la tipologia di edificio che si stava analizzando. Un altro dato fondamentale è quello dell'orizzonte temporale considerato per lo svolgimento dell'analisi, questo studio è stato realizzato con un arco temporale di 100 anni. Dopo questa fase preliminare si è potuto cominciare ad inserire i materiali di cui era composta l'intera struttura. Questa rappresenta la parte fondamentale del processo di analisi poiché tramite l'inserimento dei materiali e delle quantità usate si possono effettuare i calcoli sull'impatto. Per ogni materiale sono presenti informazioni riguardanti: le caratteristiche tecniche, le unità di misura, il GWP, il paese di provenienza, l'EPD, il profilo ambientale, ecc...

All'interno del programma è presente una suddivisione in categorie di elementi della struttura, in questo modo vengono valutate quali parti dell'edificio hanno un impatto maggiore e nello specifico quali materiali sono più contribuenti. Infatti, nella fase finale i risultati vengono forniti dal programma sotto forma di tabelle e grafici tramite i quali è possibile fare i confronti tra i materiali all'interno del progetto e nel nostro caso anche tra i due sistemi costruttivi differenti.

Questa metodologia mostra come LCA sia un processo iterativo, poiché durante lo studio si possono verificare gli effetti dei materiali e si possono modificare al fine di soddisfare l'obiettivo dello studio. Si può quindi definire come una procedura iterativa di revisione e modifica della natura e qualità dei dati raccolti e inseriti. [7]

Tutto questo processo è stato effettuato per cinque diversi scenari di progetto:

- struttura con tamponamento in blocchi di laterizio rettificato
- struttura con tamponamento in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato
- struttura con tamponamento in blocchi di laterizio rettificato senza considerare la componente impiantistica

- struttura con tamponamento in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato senza considerare la componente impiantistica
- strutture edifici esistenti

Per cui sono stati analizzate, come detto all'inizio di questo paragrafo, le strutture con i due diversi tamponamenti; poi si è andati avanti con le stesse strutture ma senza considerare la componente impiantistica e quindi ottenendo dei risultati che rispecchiassero esattamente l'impatto dei materiali della componente edile della struttura; infine si sono analizzati gli edifici esistenti del lotto. In particolare, nell'analisi di quest'ultima voce si è utilizzata solamente la sezione riguardante la demolizione così da avere dei dati riguardo alla prima parte del processo di "Demolizione e ricostruzione". Per effettuare questi calcoli, non potendo conoscere le quantità precise dei materiali presenti sul lotto, sono state eseguite delle semplificazioni. Nello specifico è stata fatta una stima dei materiali basata su valori parametrici derivanti da un'analisi su un isolato realizzato con tecniche costruttive analoghe. [11]

I valori ottenuti dalla sezione della demolizione sono stati alla fine inseriti nei risultati finali delle strutture analizzate in precedenza.

4. Applicazione al caso di studio: analisi e progetto

4.1 Analisi stato di fatto

Il progetto è stato sviluppato su un isolato appartenente al patrimonio residenziale della prima periferia di Bologna, edificato tra il 1940 e il 1965. L'isolato è delimitato: a nord-est da via Vizzani, a nord-ovest da via Bondi, a sud-ovest da via Pizzardi e a sud-est da via Mengoli. Questo lotto è stato selezionato all'interno di un campione di aree ritenute idonee a interventi di sostituzione edilizia, raccolta realizzata dal gruppo di ricerca di Architettura Tecnica. [8] I lotti inclusi in tale campionario sono stati scelti in quanto possiedono caratteristiche analoghe sia in termini di periodo di costruzione sia di configurazione urbana. Di conseguenza, gli edifici presenti condividono tra loro tratti strutturali e tipologici molto simili. [7]



Figura 6: vista aerea di Bologna con il lotto analizzato – Google Earth

Il lotto è caratterizzato da una maglia edilizia regolare, composta da 15 edifici con destinazione residenziale e disposti parallelamente alle strade che racchiudono il lotto. Come si vede dalle immagini (Figure 7-8), i fabbricati sono inseriti in un contesto residenziale corrispondente a quello descritto nei paragrafi precedenti, quindi con strutture e appartenenti al periodo del dopo-guerra e ormai obsolete dal punto di vista energetico.

Queste, infatti, sono costituite da murature esterne portanti in mattoni pieni bolognesi da 28 cm, rifinite internamente ed esternamente con intonaco a calce. Per i solai è stata considerata un'altezza strutturale compresa tra 16 e 20 cm, cui si aggiungono 2 cm relativi al massetto in calcestruzzo e alla pavimentazione in ceramica. La soletta del piano interrato in cemento armato è stata assunta con uno spessore pari a 15 cm. Le superfici finestrate sono state stimate come costituite da infissi in legno dotati di vetro singolo. Non è stato invece possibile includere nel modello la quantificazione delle reti idriche, delle linee elettriche e degli impianti di climatizzazione. L'elaborazione finale fornisce dunque un insieme di valori numerici relativi a volumi, superfici e quantità di materiale.

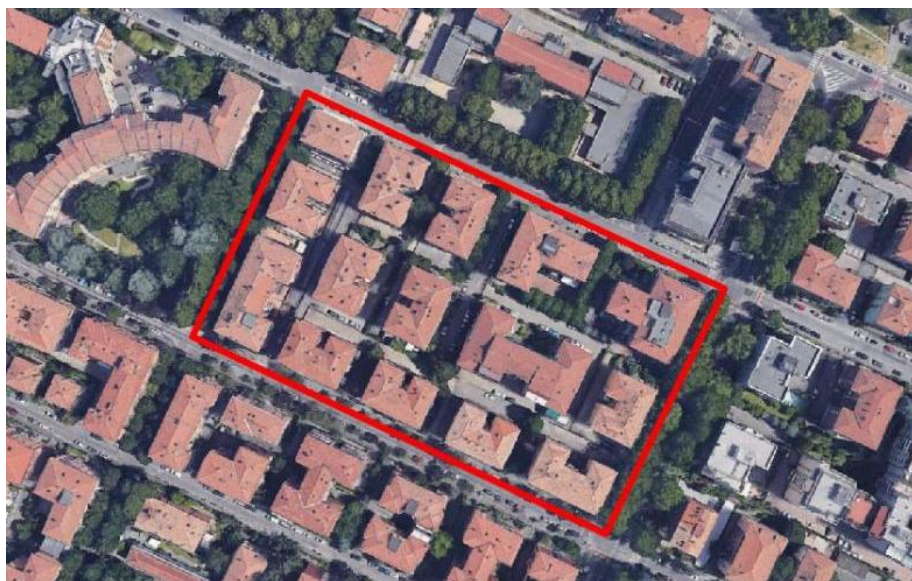


Figura 7: viste aerea in pianta dell'isolato – Google Earth



Figura 8: viste aerea in 3D dell'isolato – Google Earth

Il progetto proposto consiste in un intervento di sostituzione edilizia, che comporta la demolizione degli attuali edifici residenziali e la realizzazione di nuovi volumi. L'impostazione progettuale ha come obiettivo quello di incrementare la permeabilità del suolo, aumentando in modo rilevante le superfici verdi rispetto alla situazione esistente. Attualmente, infatti, l'area risulta in larga parte occupata dagli edifici e dai cortili interni adibiti a parcheggio degli edifici stessi.

La nuova idea di progetto prevede una diversa disposizione dei fabbricati, così da

consentire la creazione di un parco di circa 4.000 m², che diventa l'elemento centrale dell'intervento. Intorno a questo parco si sviluppano i 4 edifici che vanno a costituire il nuovo comparto.

I quattro corpi edilizi sono edifici a corte uguali a due a due e con un'altezza di 6 e 7 piani. Le quattro semi-corti che si forma così all'interno degli edifici sono rispettivamente orientate verso le strade sulle quali affacciano gli edifici. Tra questi si sviluppa lo spazio verde centrale che presenta al suo interno una mobilità sostenibile che permette di collegare le due vie parallele che delimitano il lotto a nord-est e sud-ovest. All'interno dell'isolato sono stati mantenuti e incrementati i parcheggi a raso lungo le strade, ma sono stati eliminati quelli interni al lotto e sostituiti da parcheggi sotterranei privati per gli edifici.

L'edificio di riferimento, che viene utilizzato come caso studio, è costituito da un corpo di sette piani fuori terra, di cui otto destinati alla funzione residenziale, mentre il piano terra è pensato per accogliere gli spazi comuni e di servizio del condominio.

4.2 Requisiti progettuali e demografici

Per procedere con la progettazione sono stati individuati i criteri di tipo progettuale e demografico, indispensabili per giustificare e spiegare come è stato ideato l'intervento di sostituzione edilizia. I criteri con la relativa spiegazione sono i seguenti:

- Addensamento e sostituzione urbana: L'intervento non si configura come una semplice riproposizione dello stato di fatto, ma come un'operazione di sostituzione con lo scopo di migliorare e rendere più compatto il tessuto urbano esistente. Tale obiettivo viene perseguito attraverso l'assegnazione al progetto di un volume edilizio superiore a quello attuale, entro un incremento massimo del 20%, limite ritenuto compatibile sia sotto il profilo economico sia sociale. La densificazione rappresenta inoltre una strategia efficace per contrastare i fenomeni di espansione urbana incontrollata.

- Desigillazione del suolo: La strategia di "desealing" prevede la conversione di superfici attualmente impermeabili in aree permeabili, seguendo così gli obiettivi di sostenibilità legati all'uso del suolo. Questo processo favorisce una corretta gestione

delle acque piovane e contribuisce alla riduzione delle temperature urbane, contrastando il fenomeno delle isole di calore.

- Numero massimo di piani: I nuovi edifici potranno superare l'altezza esistente di un massimo di due piani, in considerazione del fatto che gli edifici collocati nella prima periferia presentano mediamente sei livelli fuori terra. Tale vincolo serve a contenere l'impatto visivo e volumetrico dell'intervento, garantendo un buon inserimento nel contesto urbano.

- Doppio fronte finestrato: Le unità residenziali dovranno essere progettate con due affacci finestrati, al fine di assicurare adeguati livelli di illuminazione naturale, ventilazione e qualità abitativa.

- Capacità insediativa: L'aumento della volumetria rispetto allo stato attuale comporta inevitabilmente una crescita della capacità insediativa. Tale incremento risulta in linea con i criteri precedentemente definiti e rappresenta una conseguenza diretta delle scelte di densificazione adottate.

- Esclusione di fonti combustibili fossili e utilizzo di energie rinnovabili: Il progetto dovrà prevedere l'impiego esclusivo di impianti termotecnici alimentati da energia elettrica, quali le pompe di calore, escludendo l'uso di combustibili fossili. Questa scelta consente di ridurre significativamente l'impatto ambientale e risponde agli obiettivi di sostenibilità energetica. L'approvvigionamento elettrico potrà derivare integralmente da fonti rinnovabili, garantendo un funzionamento a impatto ambientale nullo.

- Progettazione bioclimatica: L'intervento dovrà garantire condizioni di benessere microclimatico sia negli spazi interni sia in quelli esterni, valorizzando le caratteristiche ambientali del sito. L'obiettivo è ridurre il fabbisogno energetico e l'impatto economico e ambientale degli impianti tecnologici. In questo senso, assumono un ruolo centrale il corretto orientamento degli edifici, l'organizzazione funzionale degli spazi, l'uso di schermature solari e lo sfruttamento ottimale della luce naturale e della ventilazione.

- Economia circolare: Il progetto dovrà adottare un approccio orientato all'economia circolare, ponendo particolare attenzione all'intero ciclo di vita dei materiali e delle tecnologie utilizzate, dalla fase di produzione fino al loro eventuale riuso o riciclo.
- Mobilità sostenibile: La mobilità interna all'area sarà prevalentemente di tipo pedonale, favorendo l'utilizzo della bicicletta e dei veicoli elettrici, al fine di ridurre l'impatto ambientale legato agli spostamenti e migliorare la qualità degli spazi urbani.
- Servizi: All'interno del complesso saranno previsti servizi dedicati alla gestione dei rifiuti, alla manutenzione delle aree verdi e alla collettività, a supporto della vita comunitaria.

CRITERI DI TRASFORMAZIONE	
Rispettare distanze dai confini secondo limiti normativi	RE
Rispettare distanze da altri edifici: pareti finestrate	RE
Rispettare distanze da altri edifici: pareti cieche	RE
Addensamento e sostituzione urbana	$SL(Sdf) < SL(Sdp) < SL(Sdf) + 20\%(Sdf)$
Desealing	$SC(Sdp) < SC(Sdf)$
Numero piano massimo	$Num\ piani(Sdp) < Num.piani(Sdf) + 2$
Capacità insediativa	$Nuno.abitanti\ Sd \geq Nuno.abitanti\ Sdf$
	$Numero\ appartamenti\ Sdp \leq Numero\ appartamenti\ Sdf$
Esclusione di fonti combustibili fossili	Pompa di Calore, elettrico ecc.
Prevedere l'utilizzo di fonti rinnovabili	art. 11 del D.Lgs. 28/2011 e DGR n.1261 del 25/07/2022 (Emilia-Romagna)
Progettazione Bioclimatica	Corretta disposizione degli ambienti interni, corretto orientamento dell'edificio, attenzione alle schermature solari, ecc.
Tema dell'Economia Circolare	Attenzione al ciclo di vita dei materiali e delle tecnologie impiegate nel progetto
Piano interrato	Sconsigliato
Mobilità sostenibile	Viabilità interna / dispositivi di ricarica 1 parcheggio
Servizi	Raccolta rifiuti / spazi ad uso collettivo (lavoro / svago / wash room.....), spazi verdi

Tabella 6: Norme e linee guida per l'elaborazione del progetto - elaborazione dell'autore

4.3 Masterplan

La progettazione del Masterplan è stata eseguita assicurandosi il rispetto delle distanze minime tra gli edifici. In particolare, la distanza minima tra fabbricati è fissata a 3,00 m nel caso di pareti prive di finestre. Qualora invece gli edifici siano uno di fronte all'altro e presentino anche una sola parete finestrata, con uno sviluppo

contrapposto superiore a 12,00 m, la separazione minima richiesta è pari a 10,00 m. Per quanto riguarda le distanze dai confini di proprietà e dalle aree a uso pubblico, il regolamento prevede che, negli interventi di nuova costruzione, inclusi quelli derivati da demolizione e ricostruzione, debba essere rispettata una distanza minima fissata a 5,00 m. [12] Il lotto presenta una forma rettangolare, per cui lungo i lati corti sono stati posizionati gli edifici più grandi e lunghi in modo da coprire tutta la lunghezza di quel lato. Infatti uno dei due corrisponde anche alla via più trafficata e frequentata della zona, quindi ideata ad ospitare una corte grande con esercizi commerciali. Lungo i lati corti sono stati collocati gli edifici più piccoli, in questo modo si è potuto lasciare spazio per le entrate dei parcheggi sotterranei e soprattutto per i percorsi ciclo-pedonali che attraverso il parco tagliano il lotto e permettono l'attraversamento del lotto stesso (Figura 9). Il masterplan progettato in questo modo ha quindi i due assi principali che corrispondono ad assi di simmetria che lo rendono equilibrato e ordinato. Attraverso questa disposizione degli edifici si è così ottenuto un parco al centro del lotto che funge da spazio di aggregazione e socialità per i residenti, migliorando la qualità urbana. Inoltre, un'area verde di quasi 4000 m² serve a mitigare gli effetti dell'isola di calore grazie alla conversione di superfici impermeabili in aree permeabili. Il masterplan organizzato in questo modo ha permesso di migliorare molti dei parametri del lotto visti in precedenza, poiché per esempio sono state aumentate le unità abitative e allo stesso tempo è diminuita la superficie di terreno coperto attraverso il desealing.

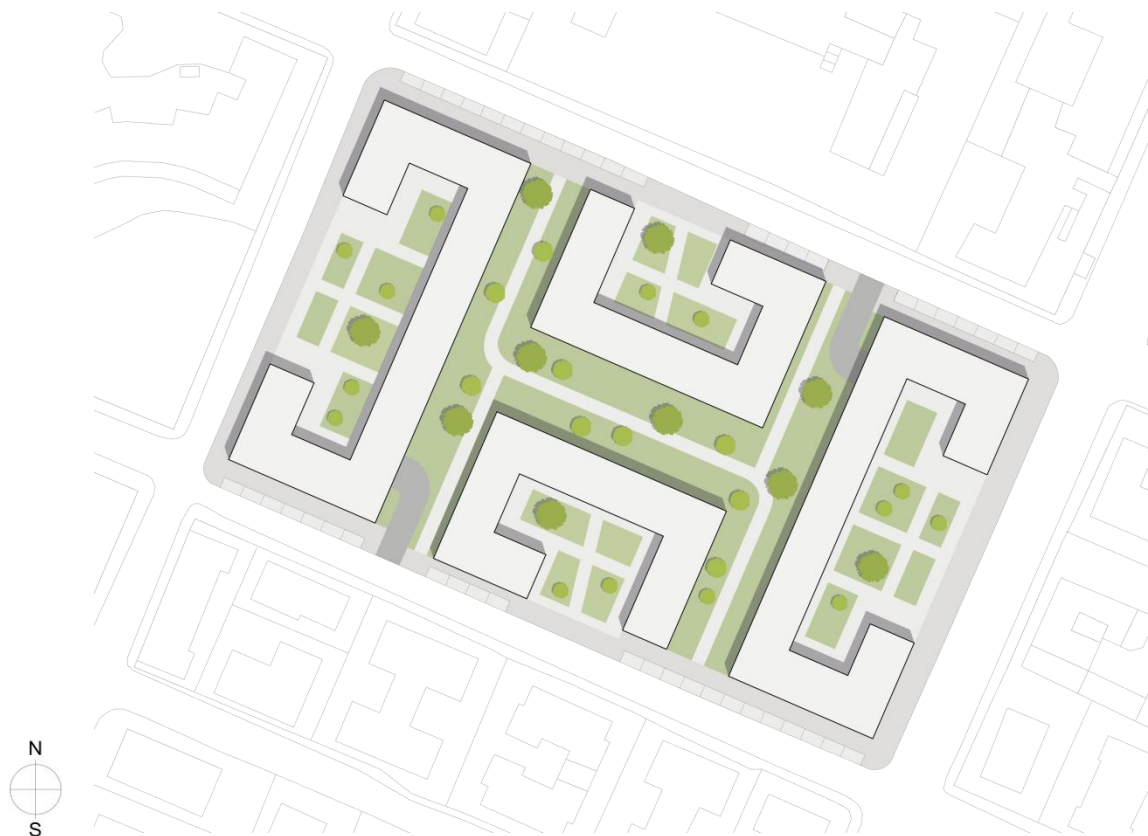


Figura 9: Masterplan del progetto - elaborazione dell'autore

Per verificare quanto detto prima è necessario fare un confronto tra lo stato attuale e quello della soluzione progettuale così da controllare l'effettivo superamento delle problematiche esistenti nel lotto.

Attualmente sul lotto sono presenti 15 edifici principali adibiti ad uso residenziale e 4 edifici secondari più piccoli, l'altezza media di quelli principali è di 19 metri con 5 piani fuori terra. Tutti questi edifici quindi hanno i piani superiori ad uso residenziale mentre, come detto prima, il 33,33% dei piani terra è ad uso commerciale. Questi dati si traducono in un numero di abitanti massimo di 1129 all'interno di 332 appartamenti, Nel complesso il lotto ha un'area di 15417,64 m², di cui 6671,86 m² sono coperti da edifici, quindi il 43,27 % (Tabella 7).

Se si confrontano questi dati con quelli progettuali si può vedere come il numero di edifici sia diminuito e nonostante questi ultimi siano più grandi, anche la superficie di suolo coperto è diminuita. Infatti, nell'idea progettuale ci saranno 6408,6 m² coperti. Il numero di piani è aumentato, con due edifici da 6 piani e due da 7 piani, questo ha così permesso di aumentare anche il numero di abitanti possibili e il numero di unità

abitative disponibili, rispettivamente di 1176 e 346. Nel complesso, quindi, sono stati pienamente rispettati i criteri di trasformazione.

	Stato di Fatto	Progetto
Edifici totale [n]	15	4
Sup. coperta totale [mq]	6672	6409
Unità abitative totali [n]	332	346
N abitanti. min. (DM 1444/1968 30mq/ab)	972,3	1308.8
N abitanti. max. (DM 1444/1968 25mq/ab)	1167	1570.6
N abitanti da posti letto	1248	650
N abitanti tot. valore medio	1129	1176

Tabella 7: Confronto dati del patrimonio edilizio prima e dopo l'intervento - elaborazione dell'autore

4.4 Progettazione degli edifici

Per la composizione degli edifici si è partiti dai due moduli appena analizzati, Modulo A e B e si è cercato di aggregarli per creare delle forme che potessero combinarsi all'interno del lotto rispettando le distanze dettate dalle normative, sia per quanto riguarda gli edifici tra loro sia per il rapporto degli edifici col contesto urbano. I moduli sono stati pensati per essere uniti tramite i lati corti così da poter garantire un doppio affaccio per le unità abitative al loro interno. Per questi motivi, dopo vari tentativi, la soluzione che rispettava tutti i criteri e permetteva edifici idonei dal punto di vista del comfort abitativo è stata quella di due edifici a corte.

Il primo, l'edificio 1, è quello che viene analizzato successivamente nello studio per ricavare i dati relativi all'impatto ambientale, occupa una superficie di 1327,7 m² ed è composto da tre moduli A e due moduli B.

L'edificio 2 invece ha una forma a corte simmetrica, è composto da quattro moduli A e tre moduli B e ha una superficie di 1848 m² che quindi ospita una corte più grande rispetto al primo edificio.

Questo approccio modulare ha permesso di ottimizzare il processo progettuale garantendo una maggiore adattabilità alle diverse esigenze delle normative.

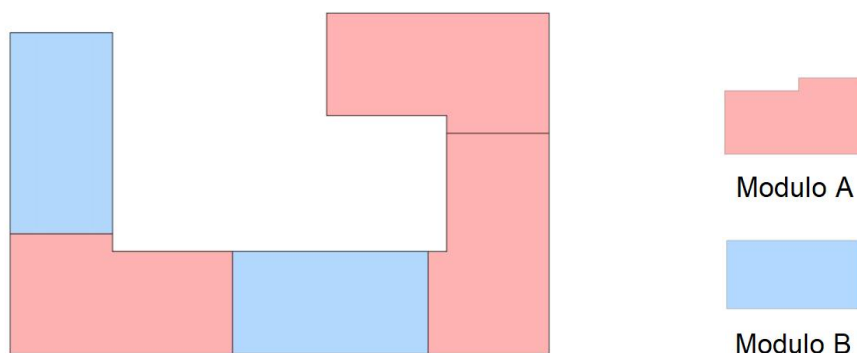


Figura 10: Composizione edificio 1 - elaborazione dell'autore



Figura 11: Composizione Edificio 2 - elaborazione dell'autore

Gli edifici che compongono il progetto sono sviluppati a partire da due moduli base. Ciascun modulo è stato progettato in modo da poter essere combinato o replicato, permettendo così di generare configurazioni spaziali diverse pur mantenendo una coerenza formale e costruttiva. Come detto in precedenza è stata usata una struttura in calcestruzzo armato, in particolare il telaio è stato realizzato combinando due moduli di campate differenti: il primo con delle luci di 4 m che vanno a formare una struttura a base quadrata, il secondo con delle campate da 4 e 6 m per avere una struttura più grande a base rettangolare. In questo modo l'elemento di congiunzione

tra le due strutture è rappresentato dai due lati di uguale lunghezza che può fungere da lato in comune. Le travi e i pilastri hanno entrambi delle sezioni di 30 e 50 cm, mentre l'altezza dei piani è di 3 metri. Tramite la ripetizione di queste due strutture sono poi stati modellati i moduli base per realizzare gli edifici.

L'unità di base A (Figura 14) è composta da tre appartamenti: un bilocale con una superficie lorda di 56 m² e due trilocali da 86 m². Si articola attorno ad un vano scale di 26.8 m² e ha uno sviluppo ad angolo, con 3 direzioni di affaccio diverse.

Il modulo B (Figura 15) invece è composto da un trilocale da 86 m² e da un quadrilocale da 101 m². Anche in questo caso gli appartamenti sono articolati attorno ad un vano scala sempre con una superficie lorda totale di 26.8 m². Diversamente da prima questo si sviluppa linearmente con due sole direzione di affacci. I due moduli hanno una superficie lorda rispettivamente di 254,8 e di 213,8 m².

Per garantire un'ulteriore tipologia di appartamento, all'ultimo piano degli edifici è presente una diversa suddivisione degli appartamenti nel modulo A, che porta alla formazione di due quadrilocali da 101 m² e da 132 m². Questa distinzione con varie metrature di appartamenti è stata realizzata per sopperire alle diverse necessità abitative delle persone.

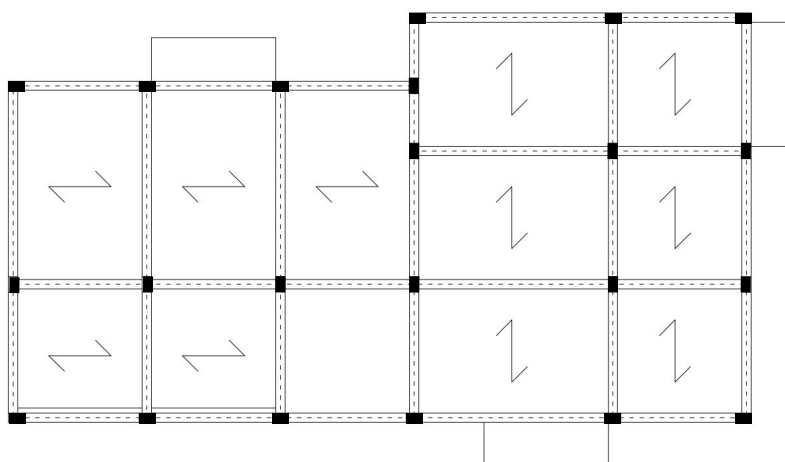


Figura 12: Schema strutturale unità di base A - elaborazione dell'autore

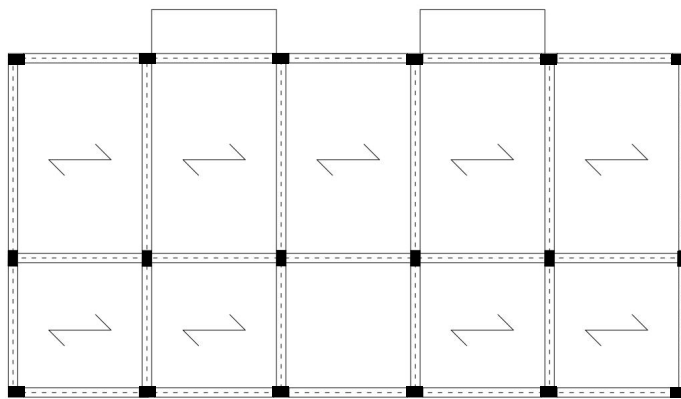


Figura 13: Schema strutturale unità di base B - elaborazione dell'autore

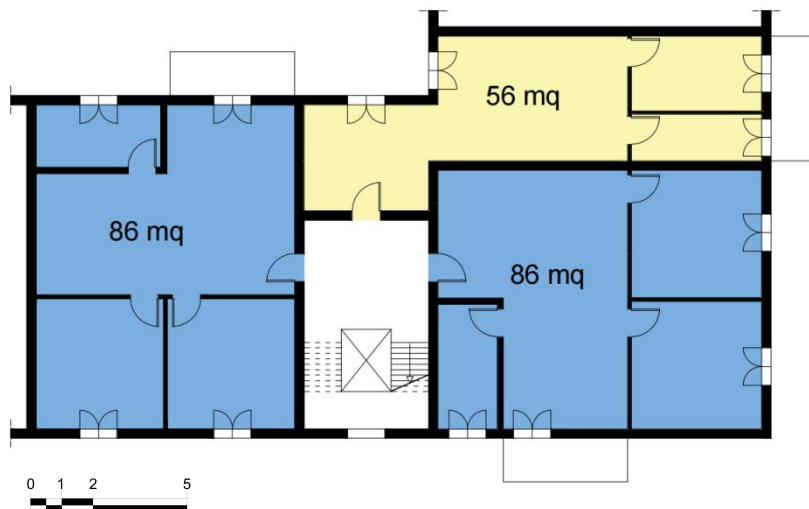


Figura 14: Piano tipo unità di base A - elaborazione dell'autore

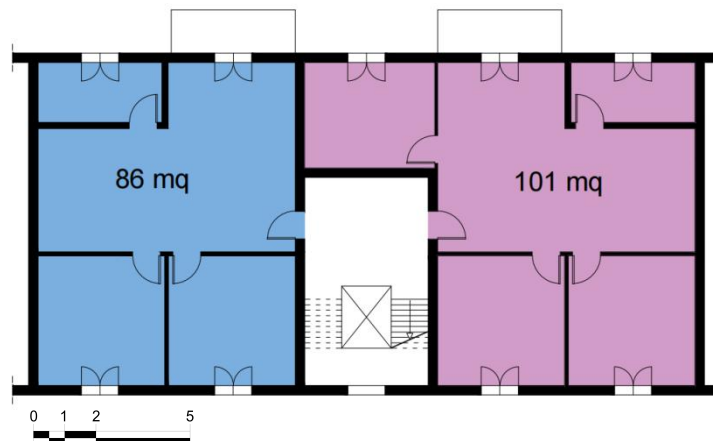


Figura 15: Piano tipo unità di base B - elaborazione dell'autore

Tutti e 4 gli edifici sono costituiti quindi da una disposizione a forma di corte e sono formati da 6 e da 7 piani fuori terra. Il piano terra negli edifici posizionati a nord-ovest e a sud-est presenta degli spazi adibiti a negozi ed attività commerciali, sono stati scelti questi edifici perché sono situati sulle strade più frequentate intorno al lotto. All'interno del sito erano già presenti numerose attività commerciali, quindi, era importante garantire degli spazi esclusivamente per questi servizi commerciali. In particolare, ci sono locali sufficienti a coprire le attività già presenti e anche per possibili nuove imprese.

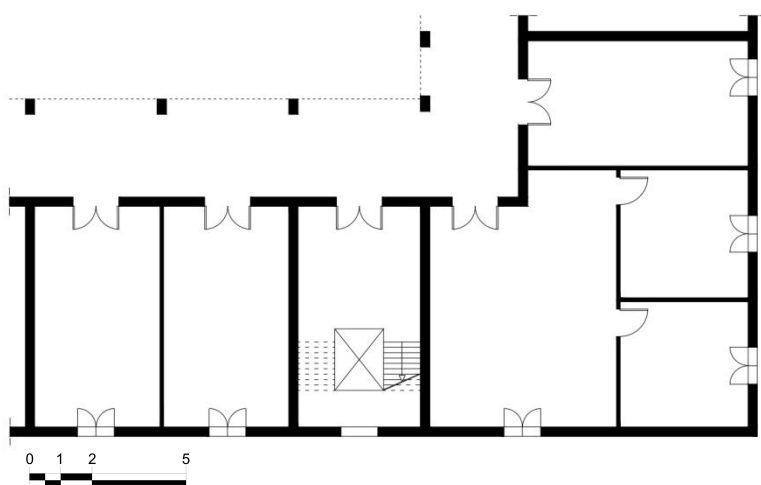


Figura 16: Piano terra A edificio con negozi - elaborazione dell'autore

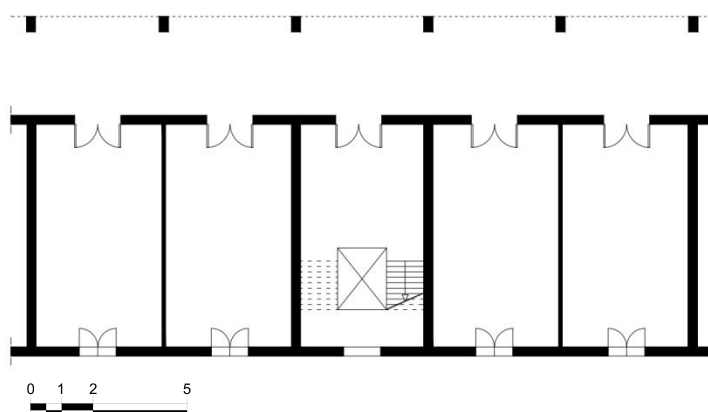


Figura 17: Piano terra B edificio con negozi - elaborazione dell'autore

Per quanto riguarda gli edifici rivolti a sud-ovest e a nord-est il piano terra è composto da ambienti di servizio e spazi comuni per il condominio.

La copertura degli edifici è piana ed è realizzata come tetto verde, quindi costituita da vegetazione di tipo estensivo e non praticabile. I vantaggi di questa tecnologia sono:

- riduzione delle temperature esterne e mitigazione dell'effetto isola di calore
- abbassamento della temperatura della superficie del tetto e degli ambienti interni
- riduzione del deflusso delle acque piovane e mitigazione del rischio di allagamenti

Alla base di tutti e 4 gli edifici è presente un porticato (Figura 20) che corre lungo tutto il perimetro interno della corte degli edifici, questo ha una funzione di mediazione tra lo spazio pubblico e quello privato, filtra il passaggio dalla strada agli esercizi commerciali. Inoltre, una corte con il portico contribuisce a migliorare la qualità dello spazio urbano rafforzando l'identità del contesto costruito.

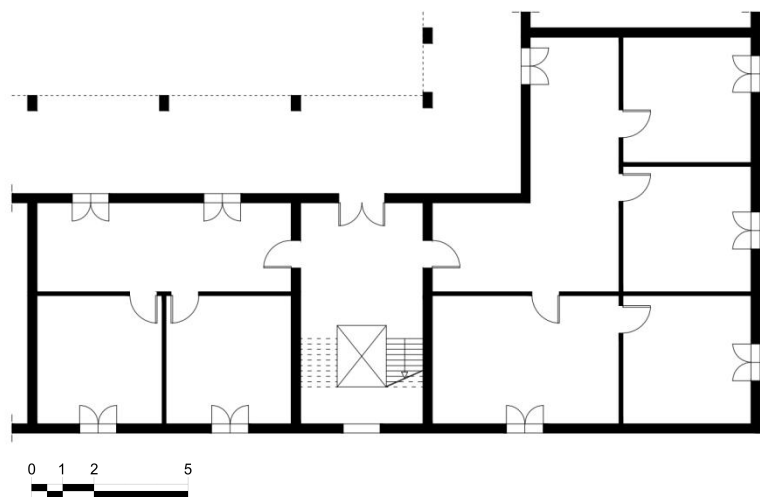


Figura 18: Piano terra A edificio senza negozi - elaborazione dell'autore

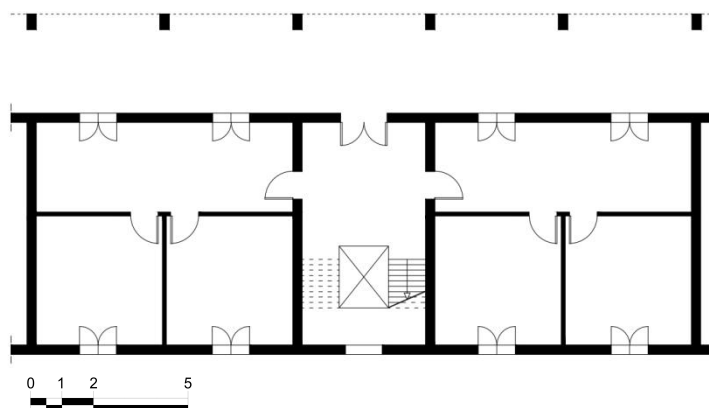


Figura 19: Piano terra B edificio senza negozi - elaborazione dell'autore

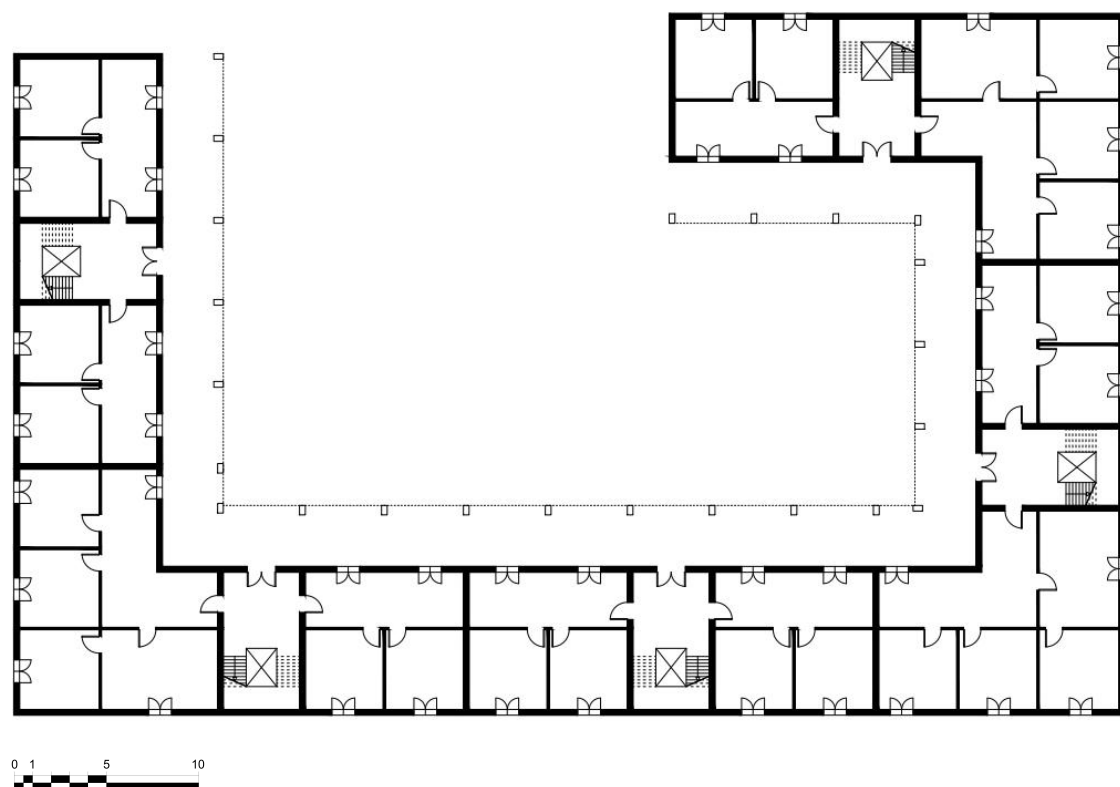


Figura 20: Pianta piano terra Edificio 1 - elaborazione dell'autore

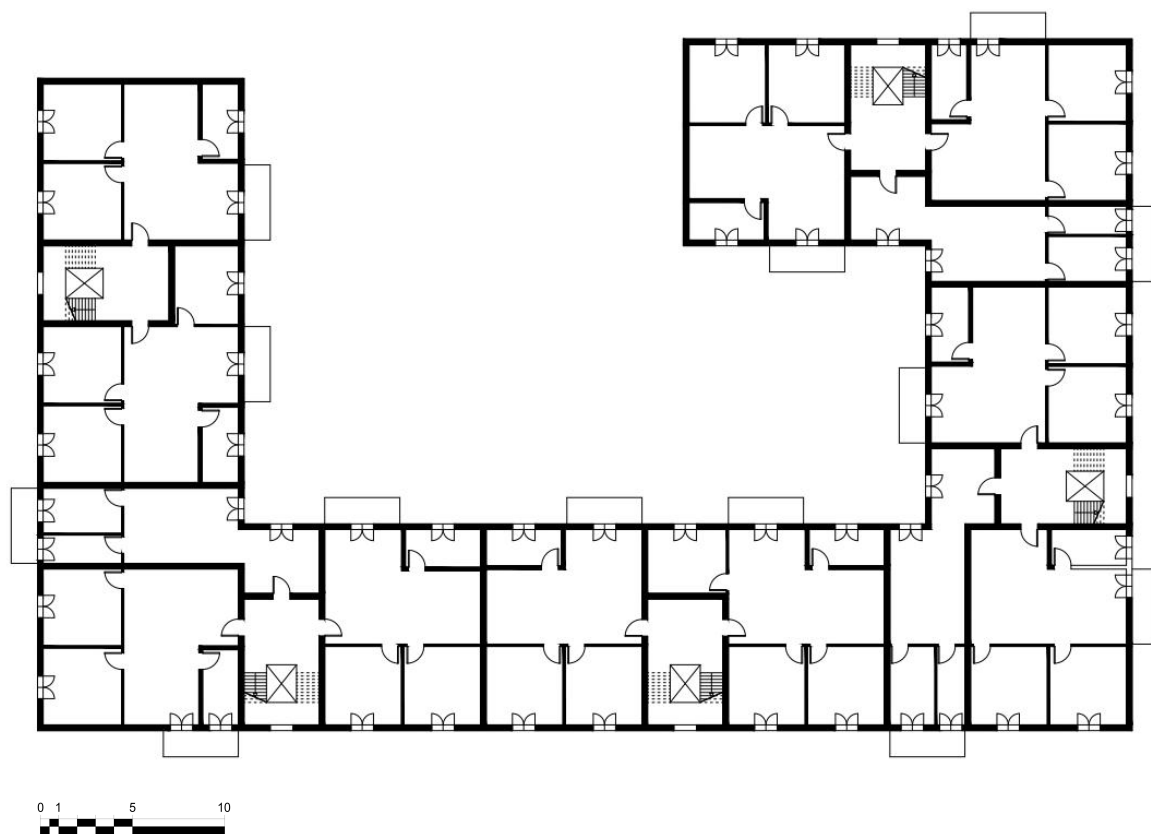


Figura 21: Pianta piano tipo Edificio 1 - elaborazione dell'autore



Figura 22: Pianta piano tipo Edificio 1 con suddivisione u.i. - elaborazione dell'autore



Figura 23: Prospetto nord-est - elaborazione dell'autore

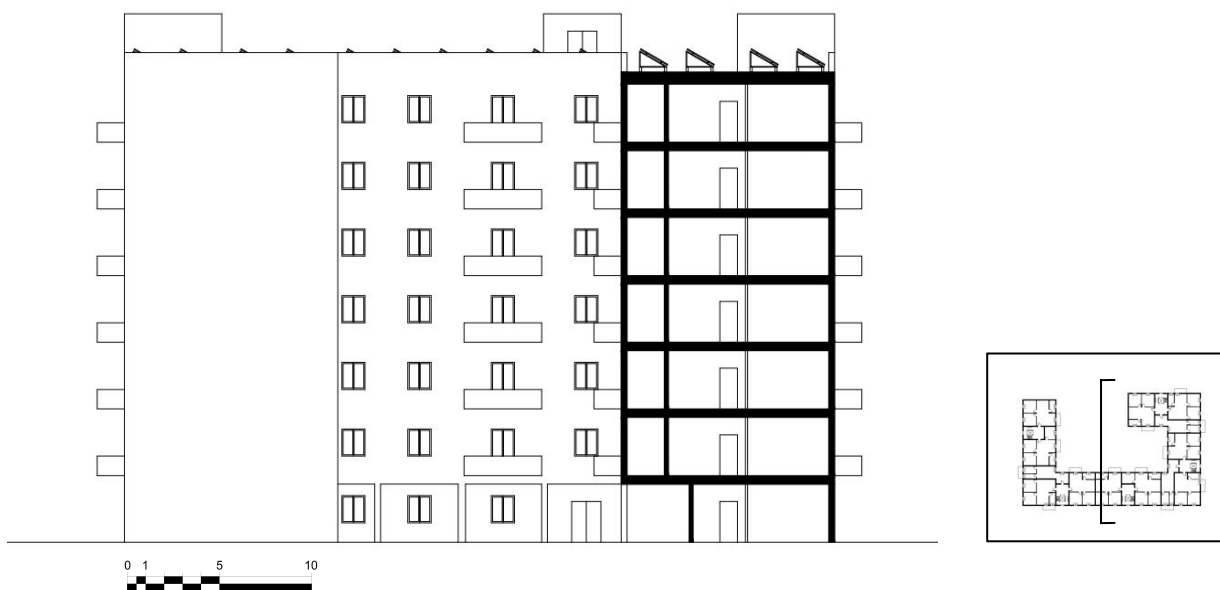


Figura 24: Sezione - elaborazione dell'autore

4.5 Analisi energetica

In questo paragrafo sono stata riassunte le stratigrafie utilizzate per la modellazione energetica, i dati e le stratigrafie sono stati ricavati e realizzate sul software EdilClima EC700. Le prime tabelle riguardano le stratigrafie degli elementi verticali, prima del sistema con blocchi di laterizio rettificato e poi con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato. Successivamente sono presenti i solai assieme agli infissi che sono gli stessi per entrambi i sistemi.

Muro esterno blocchi di laterizio rettificato	
Materiale	Sp [mm]
Intonaco di gesso	10
Porotherm Bio Plan 30 T9	300
Knauf Insulation - NaturBoard PARTITION	40
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,216	360

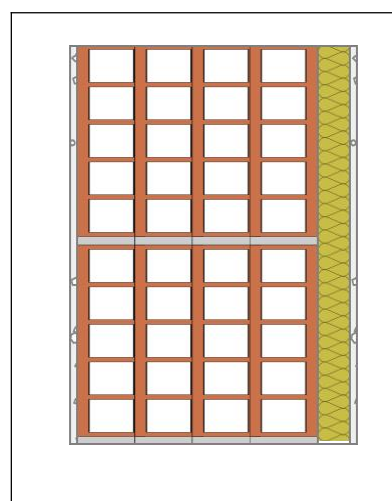


Tabella 8: Muro esterno blocchi di laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

Muro interno scale blocchi di laterizio rettificato	
Materiale	Sp [mm]
Intonaco di gesso	10
Porotherm Bio Plan 30 T9	300
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,275	320

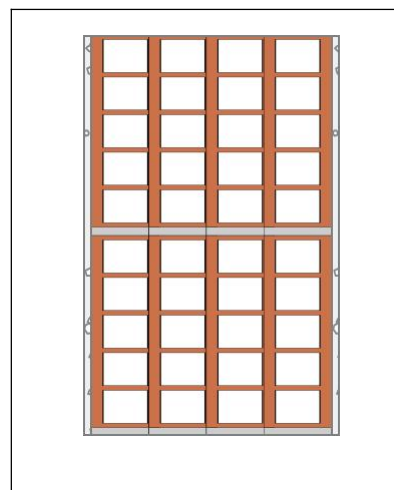


Tabella 9: Muro interno scale blocchi laterizio - elaborazione dell'autore

Muro interno blocchi di laterizio rettificato	
Materiale	Sp [mm]
Intonaco di gesso	10
Porotherm Bio Plan 20	200
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,768	220

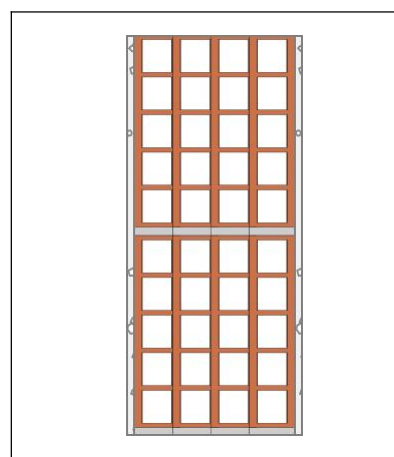


Tabella 8: Muro interno blocchi di laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

Tramezzo blocchi di laterizio rettificato	
Materiale	Sp [mm]
Intonaco di gesso	10
Porotherm Bio Plan 12	120
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
1,035	140

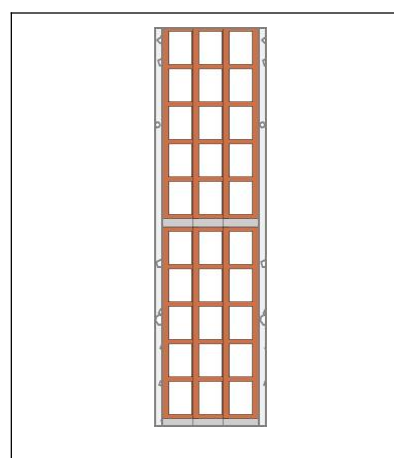


Tabella 10: Tramezzo blocchi di laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

Muro esterno blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	
Materiale	Sp [mm]
Rasante e finitura per murature interne Ytong FINISH R300	10
Climagold - Blocchi per tamponamenti monostrato	300
Intonaco di fondo alleggerito per esterni Ytong LR100	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,227	320

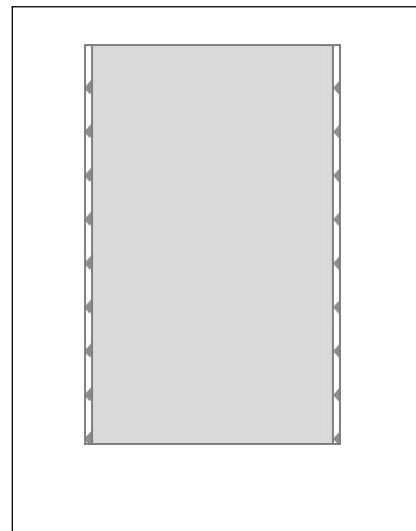


Tabella 11: Muro esterno blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Muro interno scale blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	
Materiale	Sp [mm]
Rasante e finitura per murature interne Ytong FINISH R300	10
Climagold - Blocchi per tamponamenti monostrato	300
Intonaco di fondo alleggerito per esterni Ytong LR100	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,023	320

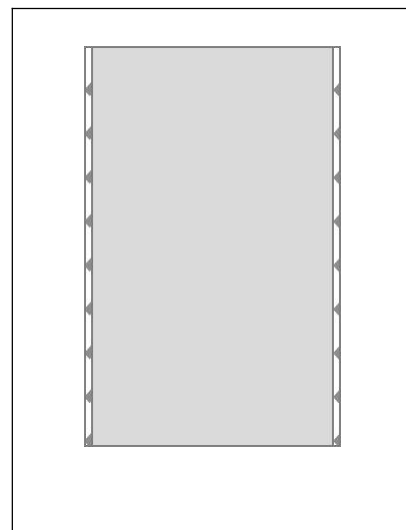


Tabella 12: Muro interno scale blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Muro interno blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	
Materiale	Sp [mm]
Rasante e finitura per murature interne Ytong FINISH R300	10
Climagold - Blocchi per tamponamenti monostrato	200
Intonaco di fondo a base di calce/cemento Ytong BASE L120	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,324	220

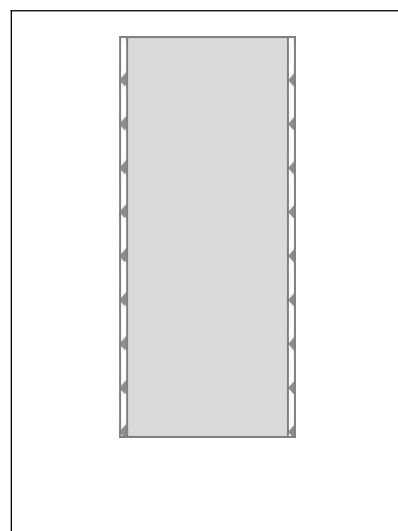


Tabella 13: Muro interno blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Tramezzo blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato	
Materiale	Sp [mm]
Intonaco di gesso	10
Climagold - Blocchi per tamponamenti monostrato	120
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,506	140

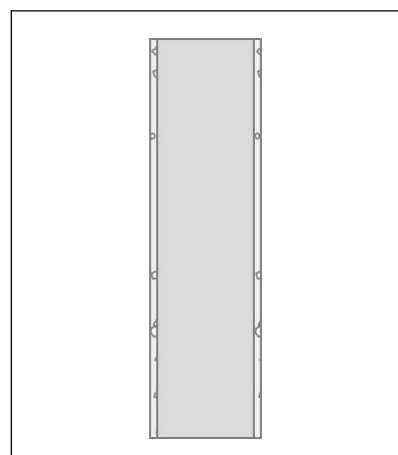


Tabella 14: Tramezzo blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Solaio copertura	
Materiale	Sp [mm]
Ciotoli e pietre frantumati (um. 2%)	40
Polipropilene	47
Impermeabilizzazione con bitume	2
URSA XPS ECO NIII L - Pannelli in polistirene estruso 1250 x 600 mm, resistenza a compressione 300 kPa	140
Barriera vapore in bitume puro	3
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	100
Soletta in laterizio	200
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0.201	542

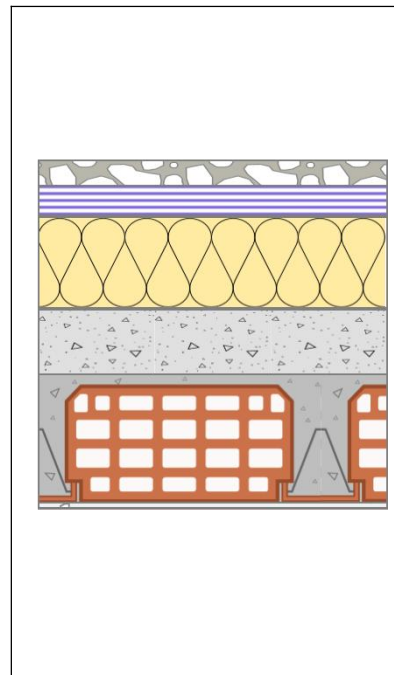


Tabella 15: Solaio copertura - elaborazione dell'autore

Solaio interpiano	
Materiale	Sp [mm]
Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	30
Pannello isolante R883-1 per impianti radianti a pavimento a secco T150 - h28	28
LecaCem Classic	100
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50
Soletta in laterizio spessore 18-20- Inter. 50	200
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0,472	428

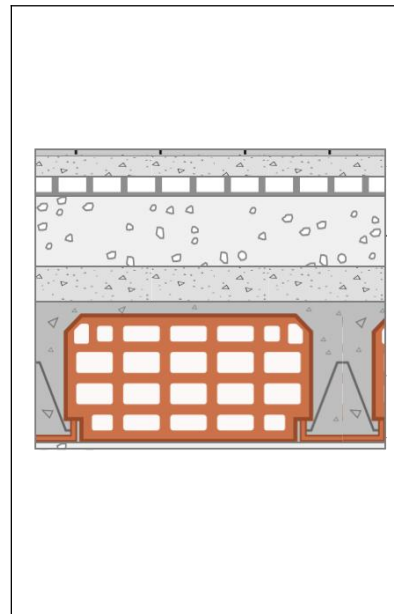


Tabella 16: Solaio interpiano - elaborazione dell'autore

Soffitto portico	
Materiale	Sp [mm]
Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	30
Pannello isolante R883-1 per impianti radianti a pavimento a secco T150	28
LecaCem Classic	100
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50
Soletta in laterizio	200
URSA XPS ECO NIII I - Pannelli in polistirene estruso 1250 x 600 mm, resistenza a compressione 300 kPa	50
Intonaco di gesso	10

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0.282	478

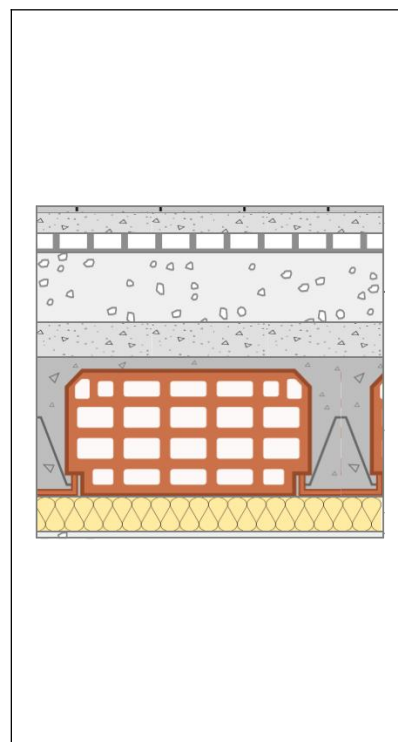


Tabella 17: Soffitto portico - elaborazione dell'autore

Solaio controterra	
Materiale	Sp [mm]
Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	30
Pannello isolante R883-1 per impianti radianti a pavimento a secco T150	28
LecaCem Classic	100
Barriera vapore in fogli di polietilene	3
URSA XPS ECO NIII I - Pannelli in polistirene estruso 1250 x 600 mm, resistenza a compressione 300 kPa	100
Impermeabilizzazione con bitume	3
C.l.s. armato (2% acciaio)	100
Intercapedine debolmente ventilata	500
Sottofondo di cemento magro	50

Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0.199	924

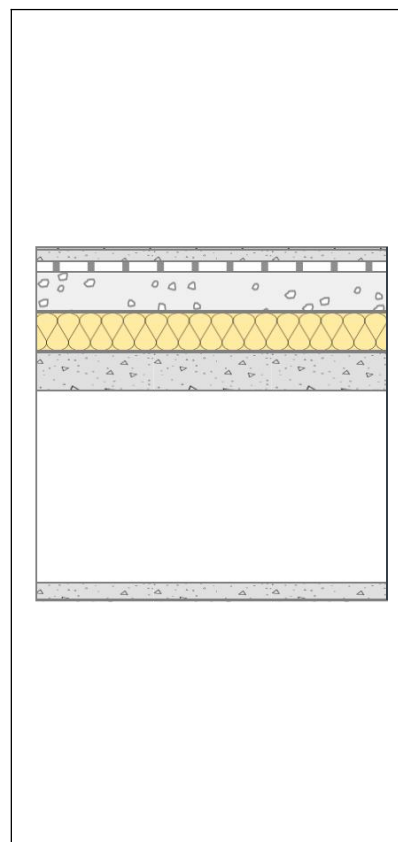


Tabella 18: Solaio controterra - elaborazione dell'autore

Porta blindata	
Larghezza [cm]	90
Altezza [cm]	210
Materiale	Sp [mm]
Legno di abete flusso perpend. alle fibre	10
Polistirene espanso per V-ESSE - V-ELLE 20/150	10
Acciaio	30
Polistirene espanso per V-ESSE - V-ELLE 20/150	10
Legno di abete flusso perpend. alle fibre	10
Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0.985	70

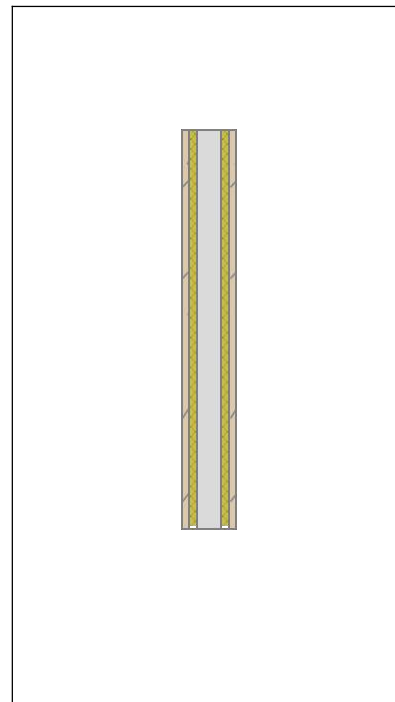


Tabella 19: Porta blindata - elaborazione dell'autore

Finestra due ante	
Larghezza [cm]	120
Altezza [cm]	140
Materiale	Sp [mm]
Primo vetro	6
Intercapedine	-
Secondo vetro	6
Intercapedine	-
Terzo vetro	6
Trasmittanza termica [W/m2K]	Spessore [mm]
0.985	70

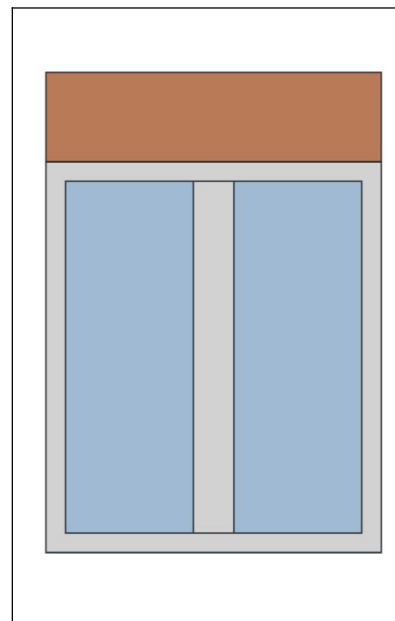


Tabella 20: Finestra due ante - elaborazione dell'autore

Porta finestra	
Larghezza [cm]	120
Altezza [cm]	240
Materiale	Sp [mm]
Primo vetro	6
Intercapedine	-
Secondo vetro	6
Intercapedine	-
Terzo vetro	6

Trasmittanza termica [W/m ² K]	Spessore [mm]
0.985	70

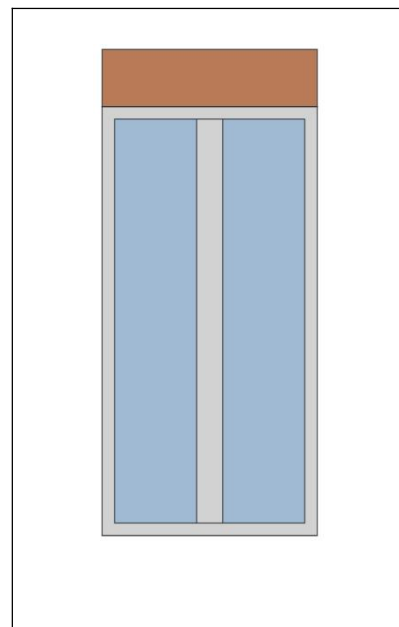


Tabella 21: Porta finestra - elaborazione dell'autore

Nelle immagini successive si possono vedere le rappresentazioni dei nodi analizzati per i ponti termici con le relative mappe termiche e le tabelle coi dati di trasmittanza e conduttività.

R - Parete - Copertura		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica copertura [W/m ² K]	0,201	0,200
Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250

Tabella 22: Ponte termico parete - copertura - elaborazione dell'autore

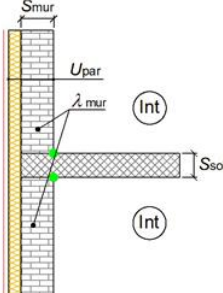
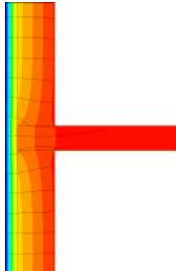
IF - Parete - Solaio interpiano		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 23: Ponte termico parete - solaio interpiano - elaborazione dell'autore

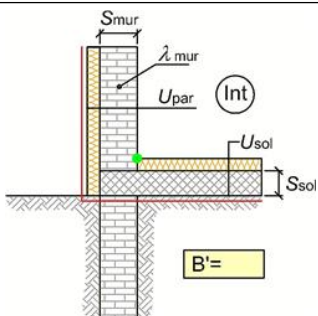
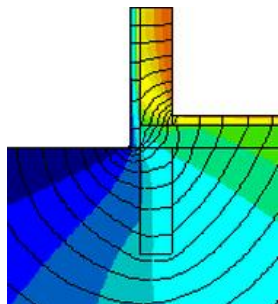
GF - Parete - Solaio controterra		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica solaio [W/m²K]	0,118	0,118
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 24: Ponte termico parete - solaio controterra - elaborazione dell'autore

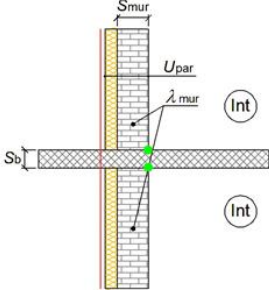
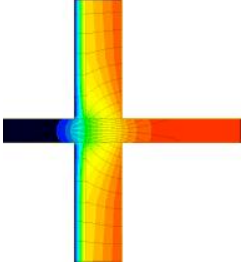
B - Parete - Balcone		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 25: Ponte termico parete - balcone - elaborazione dell'autore

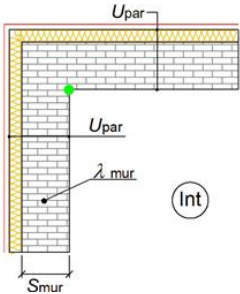
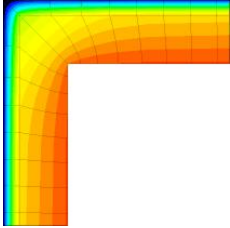
C - Angolo tra pareti		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 26: Ponte termico angolo tra pareti - elaborazione dell'autore

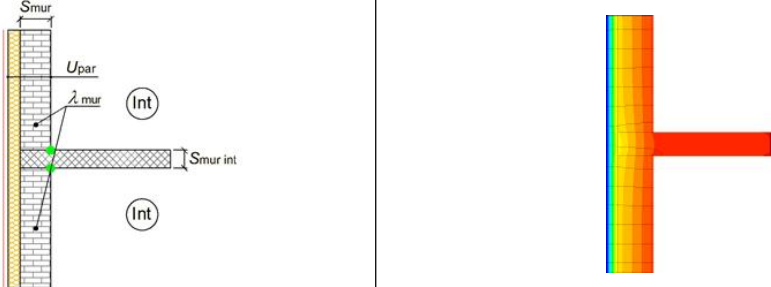
IW - Parete - Parete interna		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 27: Ponte termico parete - parete interna - elaborazione dell'autore

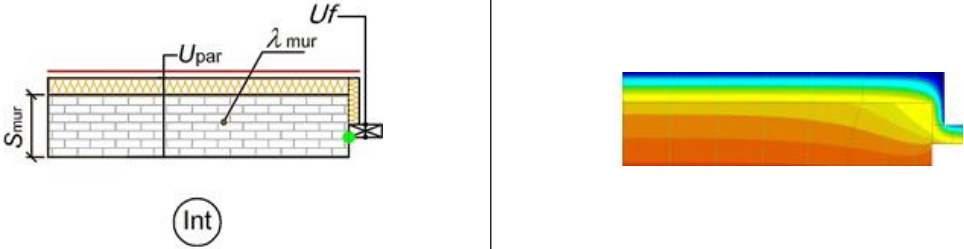
W - Parete - Telaio		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Trasmittanza termica telaio [W/m²K]	1.000	1.000
Conduttività termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 28: Ponte termico parete - telaio - elaborazione dell'autore

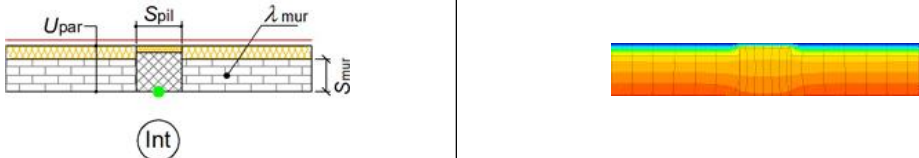
P - Parete - Pilastro		
	Laterizio rettificato	Calcestruzzo aerato autoclavato
Trasmittanza termica parete [W/m²K]	0,215	0,227
Conducibilità termica muro [W/mK]	0,250	0,250
		

Tabella 29: Ponte termico parete - pilastro - elaborazione dell'autore

Infine, nelle tabelle sottostanti (Tabelle 30-31) sono presenti le verifiche di legge necessarie per soddisfare la verifica di impatto ambientale. Come si può vedere è stato ottenuto un esito positivo in tutte le tipologie di verifiche, sia per il sistema con i blocchi di laterizio rettificato sia per quello coi i blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato,

Tipo di verifica	Esito	Valore ammissibile	Valore calcolato	u.m.
Verifica termoigrometrica	Positiva			
Verifica sulla temperatura critica interna del ponte termico	Positiva			
Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile	Positiva			
Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (Ht)	Positiva			
Indice di prestazione termica utile per riscaldamento	Positiva	20,61	> 15,63	kWh/m²
Indice di prestazione termica utile per il raffrescamento	Positiva	19,81	> 19,63	kWh/m²
Indice di prestazione energetica globale	Positiva	81,39	> 53,14	kWh/m²
Efficienza media stagionale dell'impianto per servizi riscaldamento, acqua calda s...	Positiva			

Tipo di verifica	Esito	Valore ammissibile	Valore calcolato	u.m.
Copertura totale da fonte rinnovabile	Positiva	60,00	< 83,05	%
Copertura acqua sanitaria da fonte rinnovabile	Positiva	60,00	< 87,61	%
Verifica potenza elettrica installata	Positiva	66,93	≤ 145,95	kW

Tabelle 30: Tabelle verifiche di legge per blocchi di laterizio rettificato - Ediclima

Tipo di verifica	Esito	Valore ammissibile		Valore calcolato	u.m.
Verifica termoigrometrica	Positiva				
Verifica sulla temperatura critica interna del ponte termico	Positiva				
Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile	Positiva				
Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (Ht)	Positiva				
Indice di prestazione termica utile per riscaldamento	Positiva	20,56	>	15,14	kWh/m ²
Indice di prestazione termica utile per il raffrescamento	Positiva	20,10	>	19,86	kWh/m ²
Indice di prestazione energetica globale	Positiva	81,22	>	52,57	kWh/m ²
Efficienza media stagionale dell'impianto per servizi riscaldamento, acqua calda s...	Positiva				

Tipo di verifica	Esito	Valore ammissibile		Valore calcolato	u.m.
Copertura totale da fonte rinnovabile	Positiva	60,00	<	83,25	%
Copertura acqua sanitaria da fonte rinnovabile	Positiva	60,00	<	87,74	%
Verifica potenza elettrica installata	Positiva	66,93	≤	145,95	kW

Tabelle 31: Tabelle verifiche di legge per blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato - Edilclima

4.6 Analisi di impatto ambientale

In questo paragrafo vengono messi a confronto, interpretati e contestualizzati i risultati LCA, evidenziando le differenze tra le soluzioni analizzate e individuando i fattori che maggiormente influenzano gli impatti ambientali.

Il principale criterio utilizzato per effettuare queste analisi è il Global Warming Potential (GWP) che rappresenta l'indicatore più significativo ai fini dell'analisi, poiché quantifica il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita al cambiamento climatico ed è generalmente il parametro che maggiormente incide sull'impronta ambientale complessiva dell'edificio.

Per quanto riguarda le analisi sull'utilizzo di energia primaria e di acqua è stato scelto il parametro Primary Energy (PE) suddiviso in energia rinnovabile (PERT) ed energia non rinnovabile (PENRT); è particolarmente rilevante poiché è direttamente legato all'uso di fonti fossili e di conseguenza alle emissioni climalteranti.

Oltre a questi sono stati calcolati anche altri parametri specifici, già introdotti nel capitolo 3.2.1, che rispecchiano, assieme al GWP, i principali indicatori di pressione ambientale, ciascuno dei quali misura un particolare impatto negativo sull'ambiente. In particolare: Potenziale di riduzione dell'ozono (ODP), potenziale di acidificazione (AP), potenziale di eutrofizzazione (EP), potenziale di creazione fotochimica di ozono (POCP), potenziale di riduzione abiotica (ADPE).

Nei grafici sottostanti vengono quindi indicati questi parametri, riferiti all'intero edificio,

ciascuno rappresentato dal valore in kg della sostanza a cui fa riferimento, con una suddivisione nelle varie fasi del ciclo di vita dell'edificio. [10]

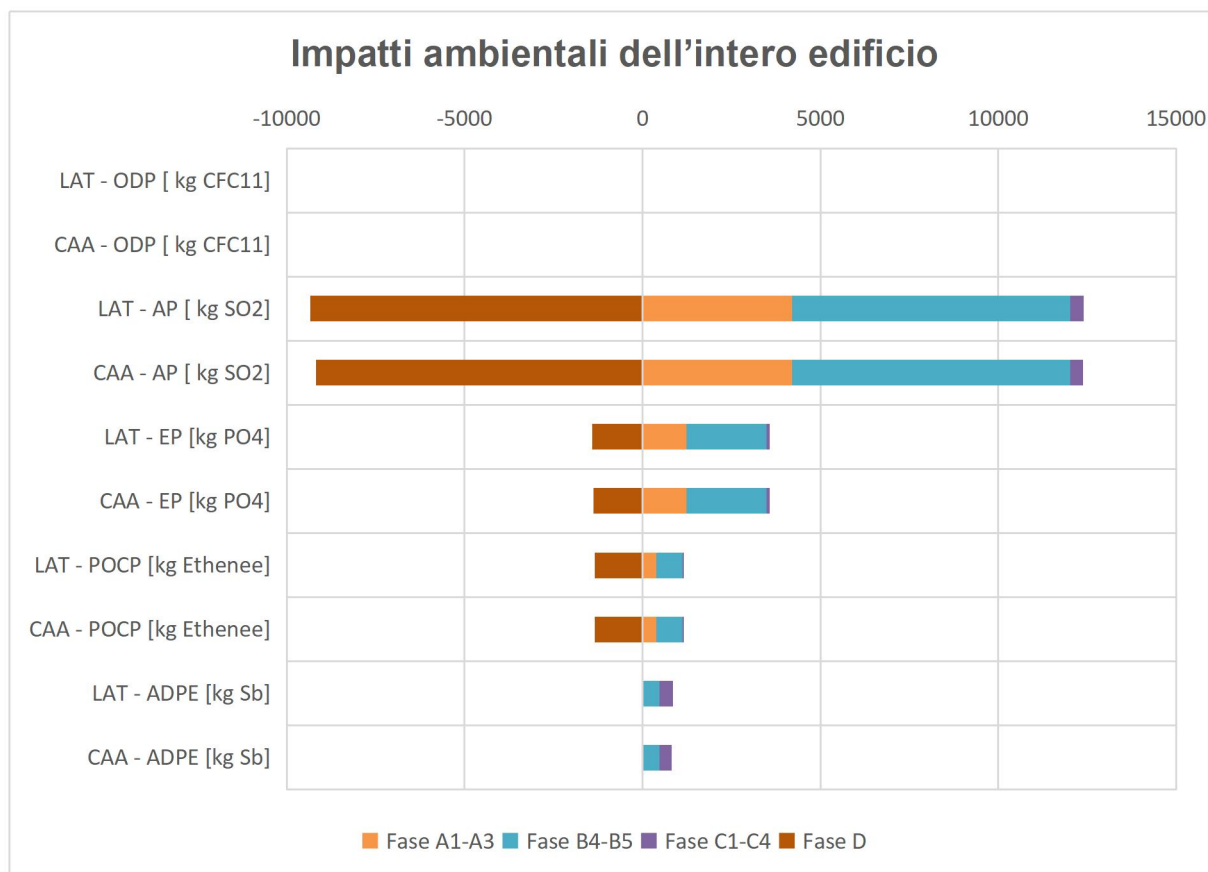


Grafico 3: Grafico impatti ambientali dell'intero edificio, diviso in fasi - elaborazione dell'autore

Queste analisi mettono in evidenza differenze significative tra laterizio rettificato e calcestruzzo aerato autoclavato nelle diverse fasi del ciclo di vita. La fase con il contributo maggiore agli impatti ambientali è la A1–A3: in questa fase il laterizio rettificato mostra valori inferiori negli indicatori di acidificazione (AP), eutrofizzazione (EP) e deplezione abiotica degli elementi (ADPE), grazie a processi produttivi meno energivori rispetto al calcestruzzo aerato autoclavato. Durante la fase di vita (C1–C4) il calcestruzzo aerato presenta prestazioni leggermente migliori, attribuibili alla minore massa volumica e alla maggiore facilità di gestione e trattamento del rifiuto, mentre il laterizio mostra valori lievemente più elevati negli indicatori AP, EP e POCP. La fase D, evidenzia contributi simili per entrambi i sistemi, con benefici ambientali analoghi che compensano parzialmente gli impatti generati nelle fasi precedenti.

Nel complesso, il laterizio rettificato risulta più vantaggioso nella fase di produzione, mentre il calcestruzzo aerato autoclavato mostra prestazioni lievemente migliori al termine del ciclo di vita.

Per quanto riguarda i materiali, sono stati considerati sistemi costruttivi senza l'inserimento delle componenti impiantistiche e dai grafici sottostanti a torta emergono differenze significative nella distribuzione. Nel caso del sistema di laterizio rettificato (Grafico 6), il grafico evidenzia un forte predominio del laterizio, questo indica come il laterizio rettificato costituisca il principale elemento di massa del pacchetto, influenzando in modo determinante gli impatti associati alla fase di produzione. Intonaco, massetto, premiscelati e piastrelle compaiono come contributi secondari ma comunque rilevanti, mentre le componenti di finitura mostrano un peso molto più contenuto.

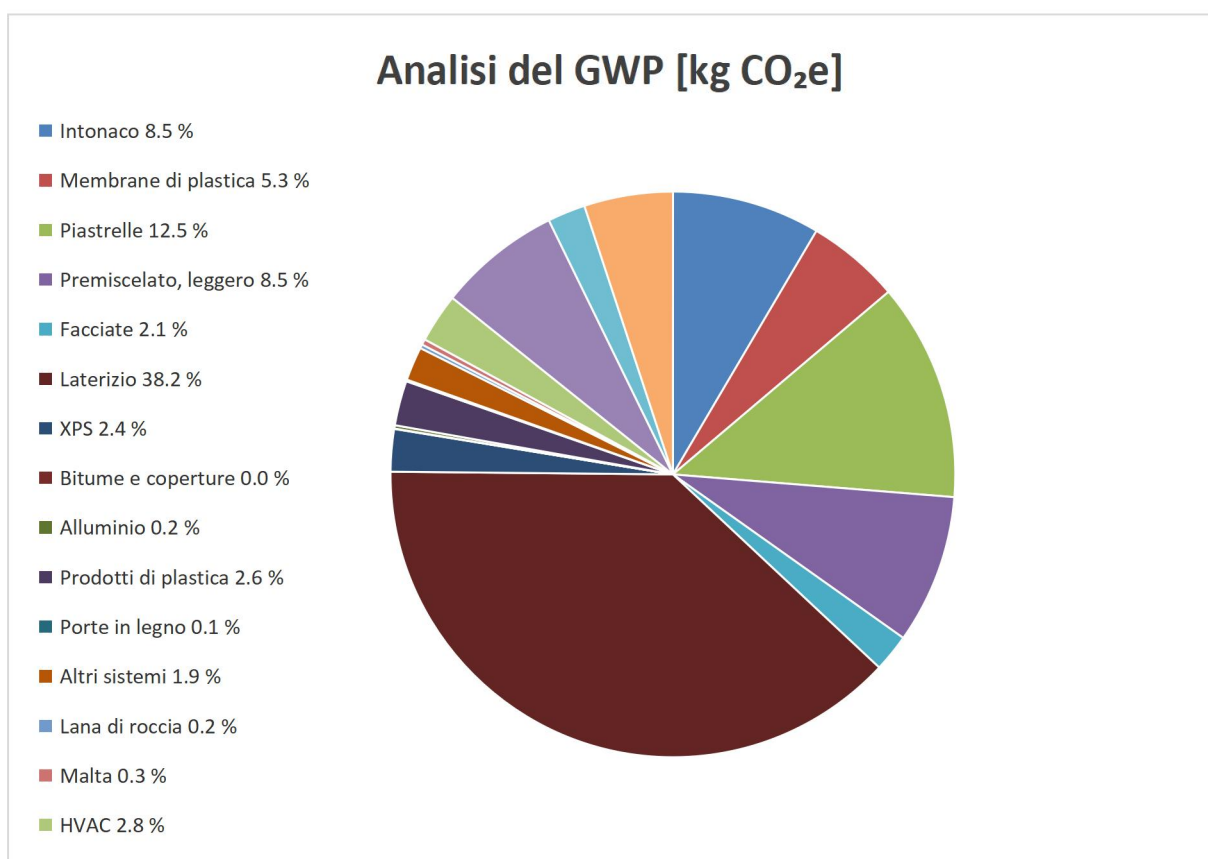


Grafico 4: Grafico a torta dei materiali, sistema in blocchi di laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

Nel sistema con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato (Grafico 7), la distribuzione cambia in modo evidente. Lo spicchio del calcestruzzo aerato sostituisce quello del laterizio come elemento dominante, ma con un volume visibilmente diverso, evidenziando una variazione nella quantità complessiva di materiale. Rispetto al sistema in laterizio rettificato, si osserva un equilibrio leggermente maggiore tra i diversi materiali: l'impatto di premiscelati, massetto, intonaco e prodotti plastici risulta più proporzionate, segnalando un contributo più omogeneo del pacchetto costruttivo.

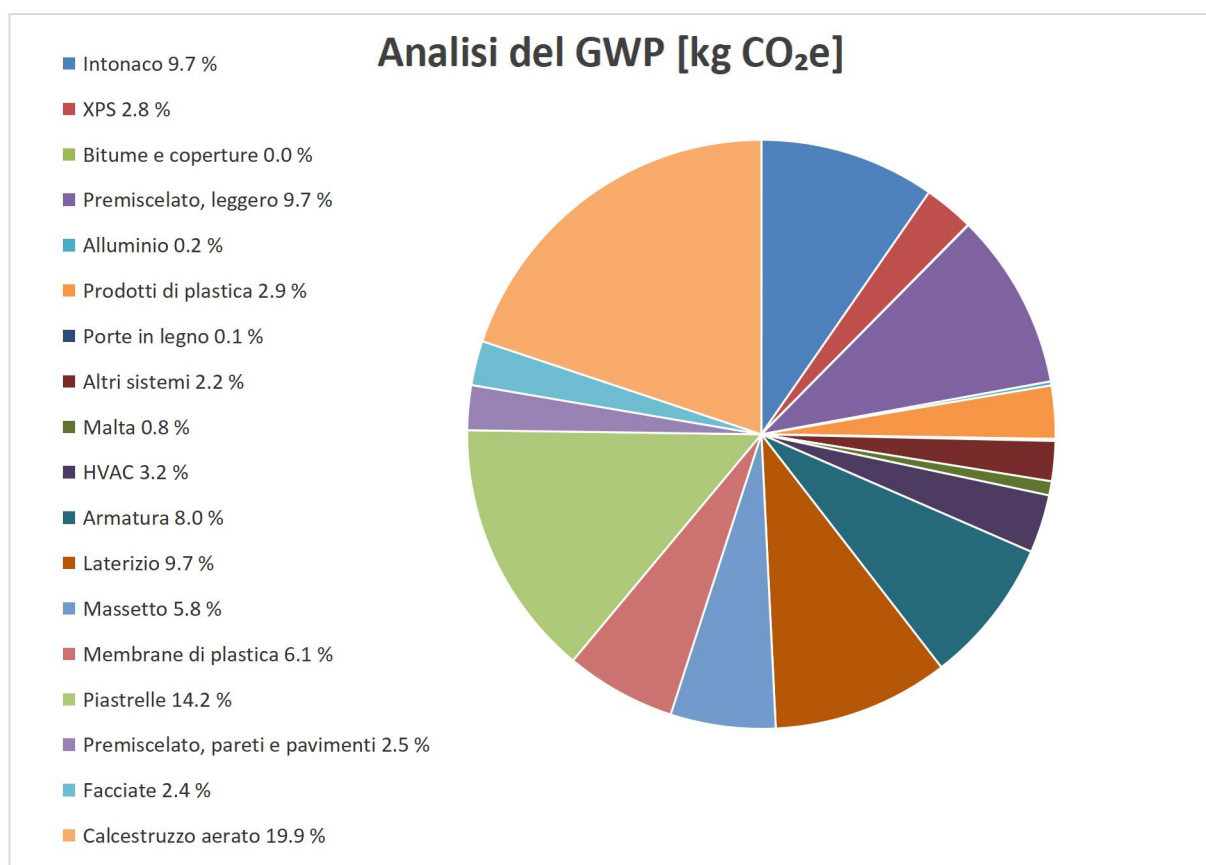


Grafico 5: Grafico a torta dei materiali, sistema in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato -
elaborazione dell'autore

Nel complesso, il confronto evidenzia come la sostituzione dei tamponamenti in laterizio rettificato con quelli in calcestruzzo aerato comporti una ridistribuzione dei

pesi tra i materiali: mentre nel sistema tradizionale il laterizio rettificato domina quasi esclusivamente il bilancio dei materiali, il sistema in calcestruzzo aerato autoclavato presenta una configurazione più bilanciata, con contributi più uniformi tra le diverse categorie. Questa variazione può avere implicazioni sia sulle prestazioni ambientali complessive sia sulle caratteristiche fisiche del pacchetto.

Oltre allo svolgimento dell'analisi LCA relativa alla realizzazione di nuovi edifici, sono state svolte valutazioni di impatto ambientale anche relativamente alla fase di demolizione del patrimonio esistente (Grafici 9-10). Per eseguire queste analisi sono stati inseriti nel software tutti i dati relativi allo smaltimento delle varie categorie di materiale, cioè tutti i rifiuti edili prodotti dalla demolizione degli edifici attualmente esistenti nell'isolato urbano. I risultati ottenuti sono poi stati uniti con quelli dei vari scenari studiati così da avere una rappresentazione completa di tutto il processo di demolizione e ricostruzione. Come si può vedere dal grafico questi dati riguardano esclusivamente la fase A5 di Gestione e trasporto dei rifiuti e la fase C1 di Demolizione.

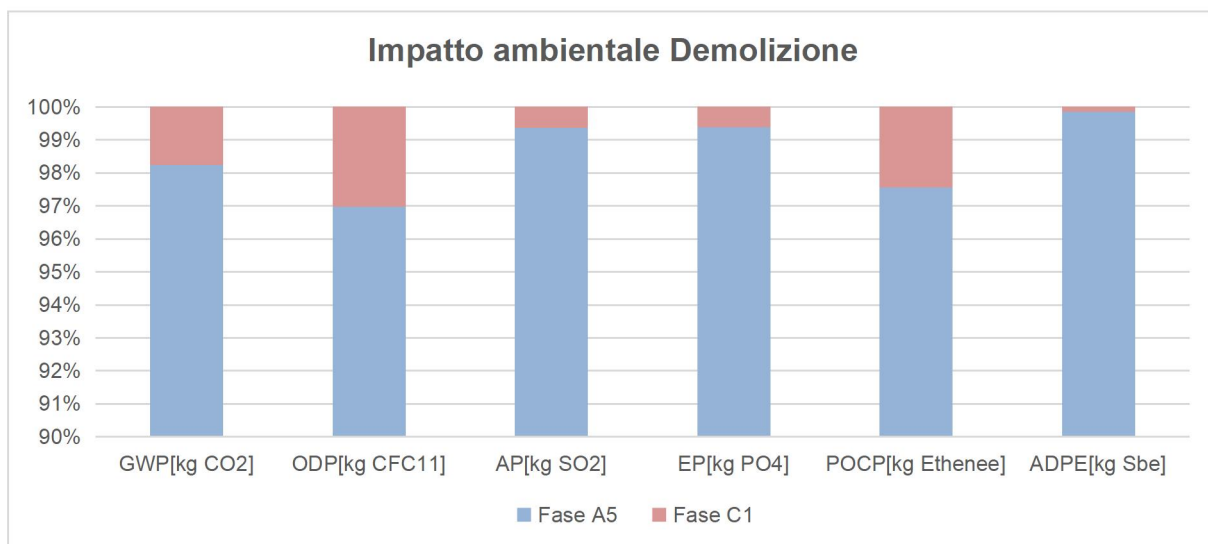


Grafico 6: Grafico sull'impatto ambientale della demolizione - elaborazione dell'autore

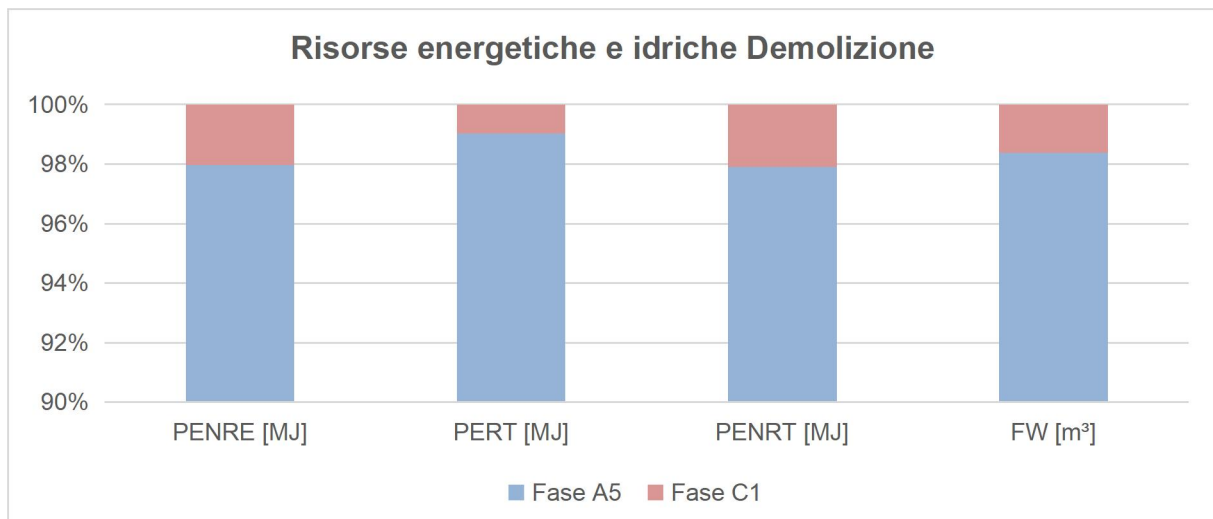


Grafico 7: Grafico sull'uso delle risorse energetiche e idriche nella demolizione - elaborazione dell'autore

4.6.1 Confronto tra componenti dell'edificio

In questo paragrafo si è passati alle analisi di confronto tra i due tipi di tamponamento utilizzati. Il primo confronto è stato compiuto tra le componenti dell'edificio suddivisi secondo la seguente classificazione:

- Fondazioni
- Solai, coperture
- Strutture portanti
- Pareti interne
- Pareti esterne
- Finestre e porte

L'impatto di queste componenti è stato confrontato per il sistema in blocchi di laterizio rettificato e quello in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato suddividendolo nelle varie fasi del proprio ciclo di vita.

La prima fase analizzata è la Fase di produzione (A1 - A3). Questa fase copre gli impatti per un prodotto o materiale pronto alla spedizione verso il cantiere, incluse le emissioni dovute all'estrazione delle materie prime, al trasporto e alla produzione. Qualora in questa fase vengano utilizzati materiali riciclati o riutilizzati, le relative emissioni vengono contabilizzate come zero. [10]

Successivamente, è stata considerata la Fase d'uso (B1 - B7), in particolare le fasi Sostituzione (B4) e Ristrutturazione (B5). Queste fasi coprono le sostituzioni pianificate di interi elementi della costruzione per riportarli al rispettivo livello prestazionale richiesto. La sostituzione di un intero elemento della costruzione causata da danni deve essere considerata come Sostituzione (B4). La sostituzione di un intero elemento della costruzione come parte di un programma concertato di sostituzioni per l'edificio deve essere considerata come Ristrutturazione (B5). [10]

Infine, si è considerata la Fase di fine vita (C1 - C4). Questa include gli impatti dovuti alla demolizione e al trasporto dei rifiuti, gli impatti derivanti dalla lavorazione dei flussi di rifiuti di costruzione riciclabili ai fini di riciclo (C3) fino alla fase di fine vita, assieme agli impatti dovuti alla pre-lavorazione e alla messa in discarica dei flussi di rifiuti non riciclabili (C4) in base al tipo di materiale. [10]

Per avere uno sguardo completo su tutto il ciclo di vita delle componenti è stato utilizzato un grafico a barre impilate suddivise nelle varie fasi (Grafico 11).

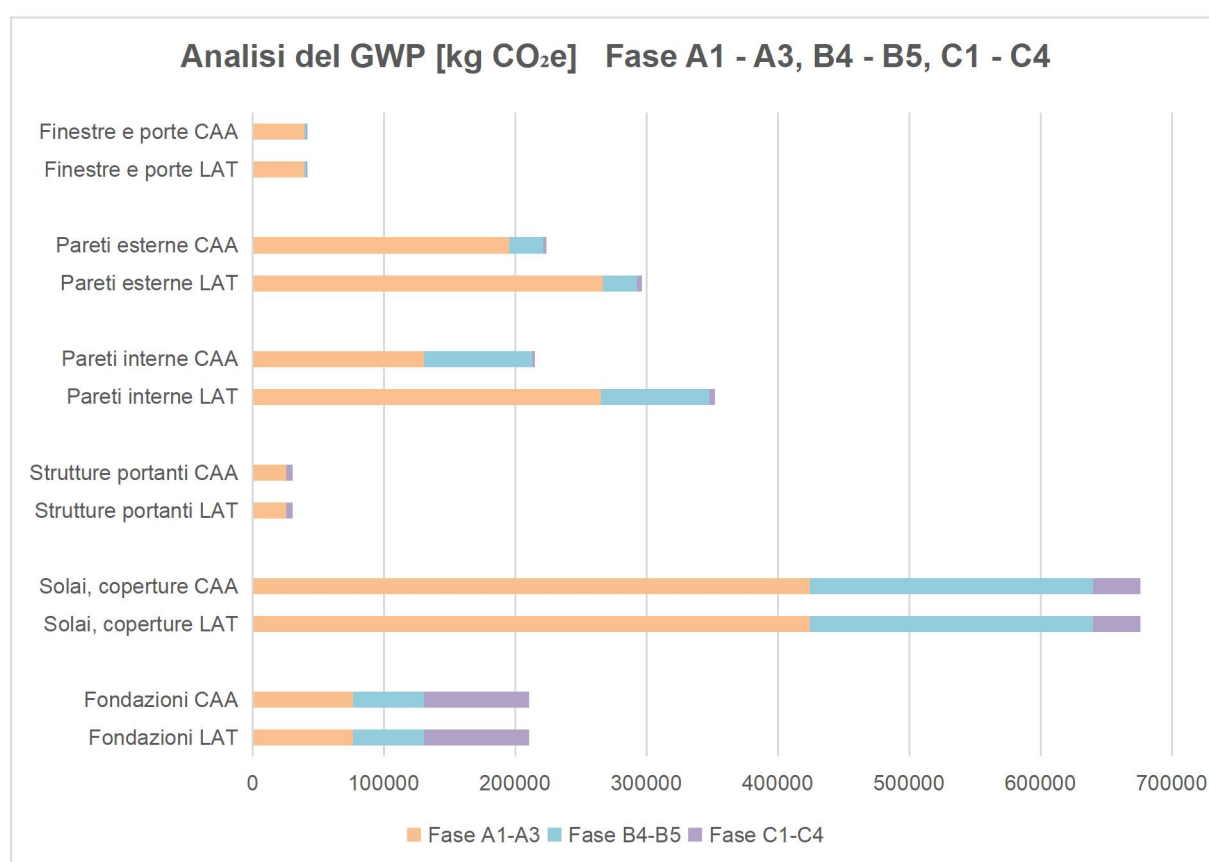


Grafico 8: Grafico sull'analisi del GWP delle componenti edilizie nelle fasi del ciclo di vita -
elaborazione dell'autore

Le prime considerazioni generali che si possono fare riguardo a questo grafico si riferiscono ai valori delle categorie di Finestre e porte, Strutture portanti, Fondazioni e Solai e coperture che risultano uguali per i due tipi di soluzione analizzati, poiché sono stati impostati come parametri costanti; infatti, tra un sistema e l'altro, sono stati modificati solamente i tamponamenti variando la tipologia di blocchi in laterizio o in calcestruzzo aerato autoclavato.

Per quanto riguarda la categoria delle strutture portanti invece, sono stati presi in considerazione travi e pilastri che vanno a formare il telaio portante in calcestruzzo armato dell'edificio. Diversamente dalle altre componenti, in questa sezione non sono presenti i moduli B4 e B5, questo perché la struttura portante non viene mai sostituita né rinnovata durante la vita utile dell'edificio. Il calcestruzzo armato ha infatti una durabilità pari o superiore alla durata dell'edificio e non richiede interventi di sostituzione programmata. Per questo motivo il contributo della struttura viene considerato solo nei moduli A1–A3 e C1–C4, mentre B4 e B5 risultano pari a zero.

Proseguendo con la discussione in merito alla comparazione dei valori di GWP tra le varie categorie, quella di solai e coperture emerge come quella che registra l'impatto climatico complessivo più elevato, sia nella soluzione in calcestruzzo aerato autoclavato (CAA) sia in laterizio (LAT). Questo elemento si distingue nettamente rispetto a tutti gli altri, raggiungendo valori totali notevolmente più alti e costituendo la principale fonte di emissioni dell'intero edificio. Il motivo è dato dalla quantità molto elevata di materiale impiegato e nel ruolo strutturale che richiede componenti con un forte impatto.

Subito dopo, un contributo significativo è fornito dalle pareti interne e da quelle esterne, soprattutto nella configurazione in laterizio (LAT). Le fondazioni mostrano un impatto intermedio, ma comunque rilevante. La massa di materiale impiegata e la messa in opera contribuiscono infatti a generare un quantitativo significativo di emissioni, anche se minore rispetto ai solai. Infine, l'impatto delle finestre e porte, sia in CAA che in LAT, risulta il più basso tra tutte le categorie analizzate. Gli infissi rappresentano una porzione molto ridotta dell'edificio in termini di massa e materiale impiegato, quindi generano un impatto notevolmente inferiore rispetto agli altri componenti.

Se invece ci si concentra sulle categorie dove vengono impiegati i diversi blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato (CAA) e laterizio (LAT), quindi le pareti esterne e le pareti interne, l'analisi evidenzia differenze significative nell'impatto ambientale, dovute sia alla diversa funzione degli elementi edilizi sia alla natura dei materiali impiegati. Per le pareti esterne, gli impatti risultano più elevati; questo è dovuto alla maggiore massa richiesta per garantire prestazioni termiche adeguate, una resistenza meccanica idonea e una certa durabilità nel tempo. Infatti, per le pareti esterne sono utilizzati blocchi da 30 cm di spessore, mentre per quelle interne gli spessori variano tra i 12 cm per i tramezzi e i 30 cm per le partizioni tra una unità e l'altra. In questo contesto, il CAA mostra valori di impatto inferiori rispetto al laterizio; questo divario deriva dal processo produttivo del CAA, che richiede meno materiale per raggiungere le stesse prestazioni isolanti grazie alla sua struttura più porosa e leggera. Inoltre, il ciclo di vita del CAA comporta un impiego minore di risorse e una riduzione dei trasporti del materiale, contribuendo a un'impronta ambientale complessivamente più contenuta. [13]

Al contrario, le pareti esterne in laterizio presentano impatti maggiori, in particolare nella fase di produzione; questo è causato dall'estrazione delle materie prime e dalla metodologia di produzione che avviene tramite la combustione all'interno di altiforni. La maggiore densità del materiale richiede quantità superiori a parità di prestazioni termiche, portando così ad un aumento degli impatti totali. [14]

La fase di produzione per i blocchi in laterizio risulta essere, in tutte le categorie, la componente con l'impatto più elevato, sia rispetto al calcestruzzo sia rispetto alle altre fasi del ciclo vita del laterizio stesso.

Per le pareti interne invece, le differenze tra CAA e laterizio tendono ad attenuarsi; questo dipende dal fatto che tali elementi non necessitano di elevate prestazioni isolanti o di resistenza agli agenti atmosferici, riducendo quindi la complessità delle stratigrafie. Infatti, le pareti interne sono concepite principalmente come divisori tra ambienti. Anche in questo caso il CAA mantiene valori tendenzialmente inferiori, ma con uno scarto più contenuto rispetto alle pareti esterne, poiché le sue proprietà risultano meno determinanti nel confronto delle prestazioni.

4.7 Confronto tra sistemi con e senza integrazione impiantistica

Dopo questa analisi focalizzata in particolare sulle componenti delle strutture, si è passati ad un confronto più generale delle due diverse configurazioni di sistema costruttivo, con tamponamento in blocchi di laterizio rettificato e con tamponamento in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato, senza considerare i materiali della componente impiantistica.

Come parte impiantistica, vengono intese, a livello di materiali, tutte le componenti relative al sistema di riscaldamento e raffrescamento (pompa di calore) e tutto il sistema di pannelli per il solare fotovoltaico.

Per questa analisi quindi si è lavorato su due paradigmi:

- Cradle to Cradle A1 - D
- Cradle to Grave A1 - C4

Il Cradle to Cradle è un concetto di sostenibilità che propone un modello alternativo al tradizionale ciclo “dalla culla alla tomba” (Cradle to Grave) analizzato in seguito.

Invece di concepire i materiali come prodotti destinati a diventare rifiuti, vengono trattati come risorse che possono rientrare continuamente nel ciclo produttivo, senza così perdere valore né danneggiare l'ambiente. L'obiettivo principale è quindi trasformare ogni prodotto o materiale in qualcosa di circolare, cioè riutilizzabile o riciclabile, riducendo sprechi e impatti ambientali.

Si integra facilmente con l'approccio LCA, dove gli impatti ambientali dei materiali sono analizzati nelle fasi A1–D. Come si è visto in precedenza: A1–A3 è la fase di produzione; B è la fase d'uso; C è la fase di fine vita; e infine D contiene i benefici e i carichi oltre il ciclo di vita del bene. Questo modulo finale fornisce trasparenza riguardo ai benefici ambientali o ai carichi dovuti all'uscita da un sistema di prodotti riutilizzabili, materiali riciclabili e/o fonti di energia utile. [10] Il modulo D rappresenta il cuore dell'analisi Cradle to Cradle, perché misura il reale potenziale rigenerativo del materiale, trasformando quello che in altri modelli sarebbe considerato rifiuto in una risorsa, secondo un processo circolare.

4.7.1 Sistema con tamponamento blocchi di laterizio rettificato

Come prime strutture sono state analizzate quelle con i blocchi di laterizio rettificato e si è quindi partiti dall'approccio Cradle to Cradle (A1 - D).

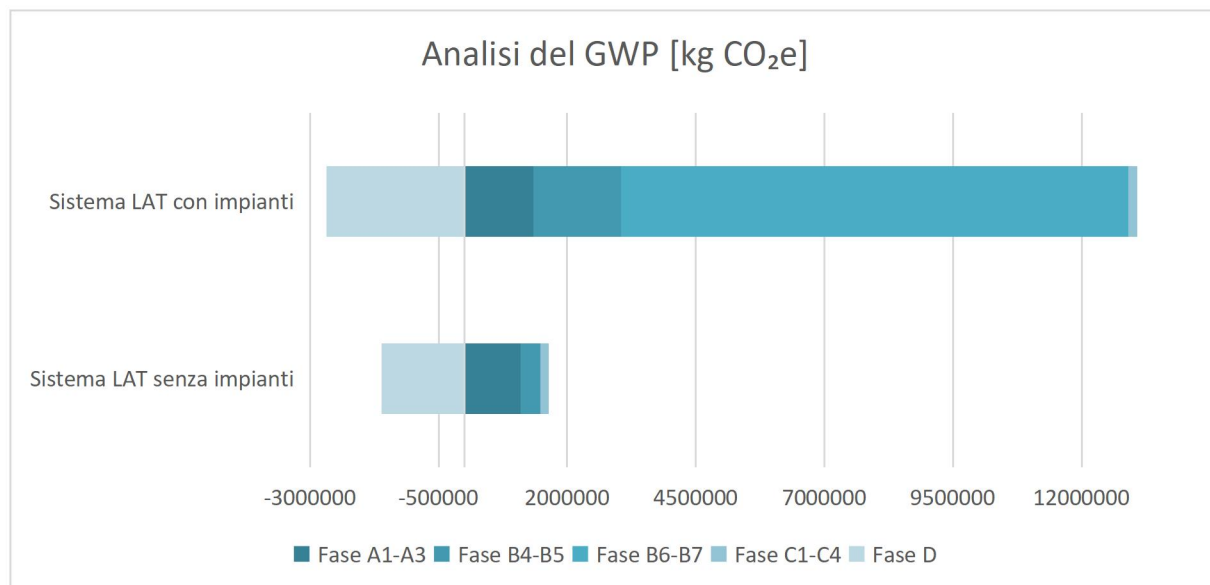


Grafico 9: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

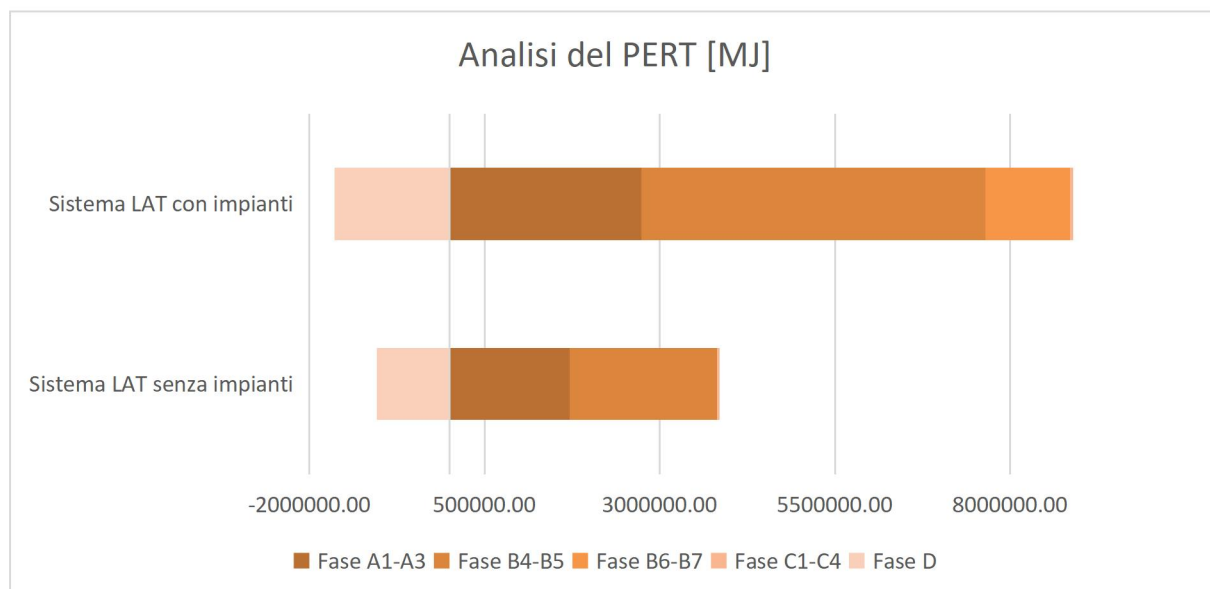


Grafico 10: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

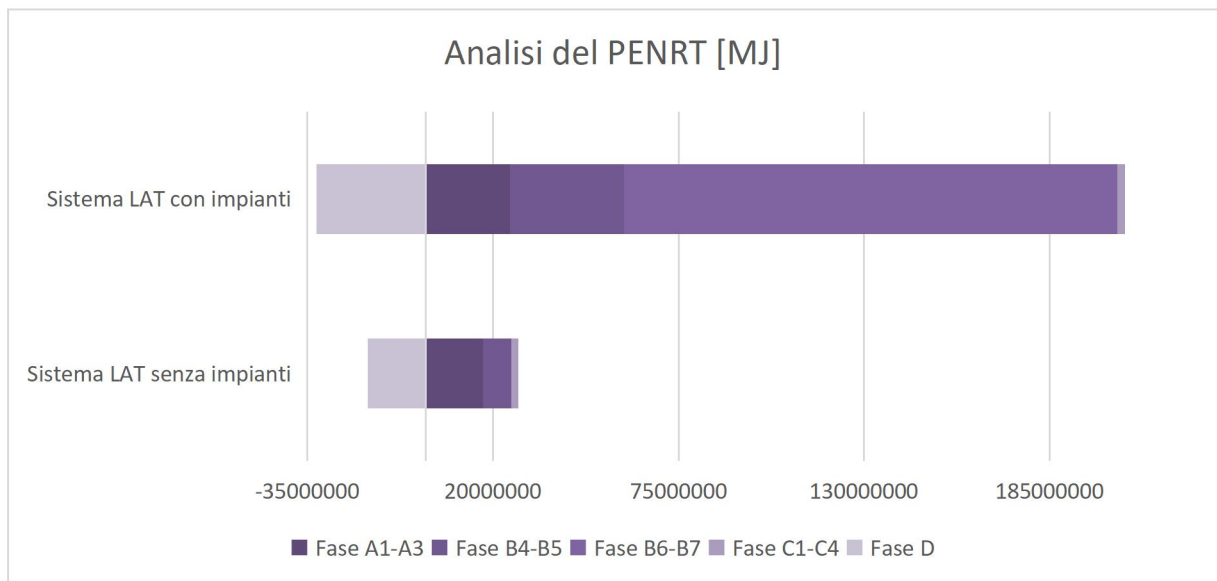


Grafico 11: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

Dopodiché si è passati all'analisi di tipo Cradle to Grave (dalla culla alla tomba) che si basa su un approccio che consente di analizzare l'impatto ambientale di un prodotto lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla nascita alla fine della vita utile. Infatti, questa analisi considera tutte le fasi, dalla produzione delle materie prime fino allo smaltimento finale del prodotto. Questo approccio si concentra principalmente su come le risorse naturali vengono estratte, trasformate e utilizzate, e su quali emissioni, rifiuti o inquinanti vengono generati durante ogni fase del ciclo di vita. Questo metodo è spesso alla base delle analisi LCA e, a differenza del Cradle to Cradle, parte dall'idea che ogni prodotto abbia un ciclo di vita lineare che termina inevitabilmente con lo smaltimento.

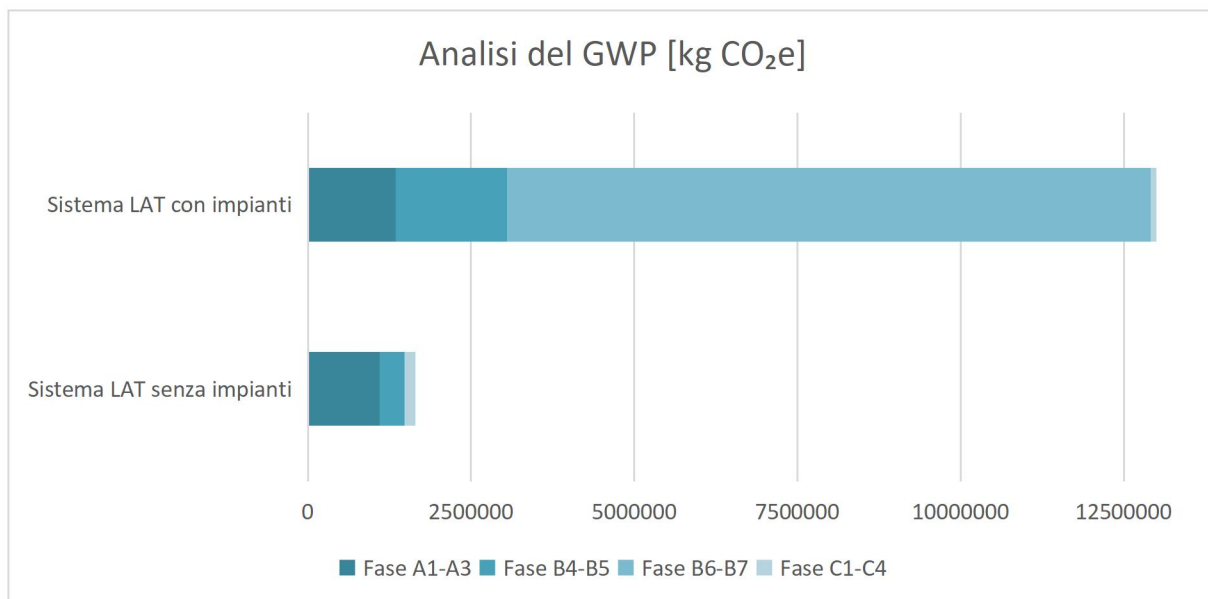


Grafico 12: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

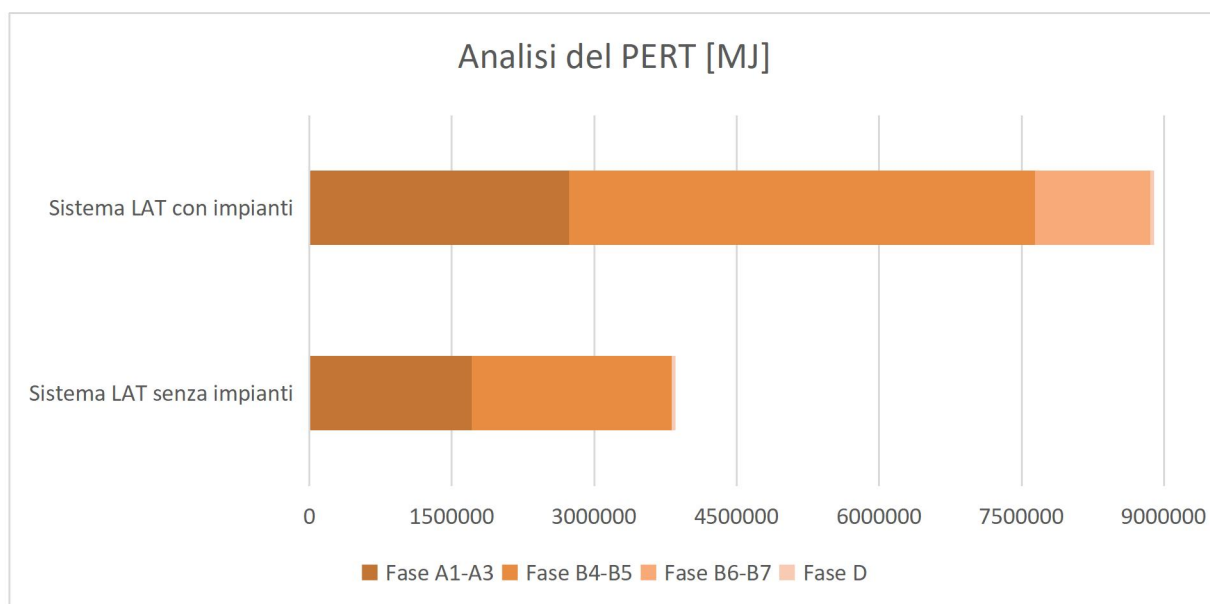


Grafico 13: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

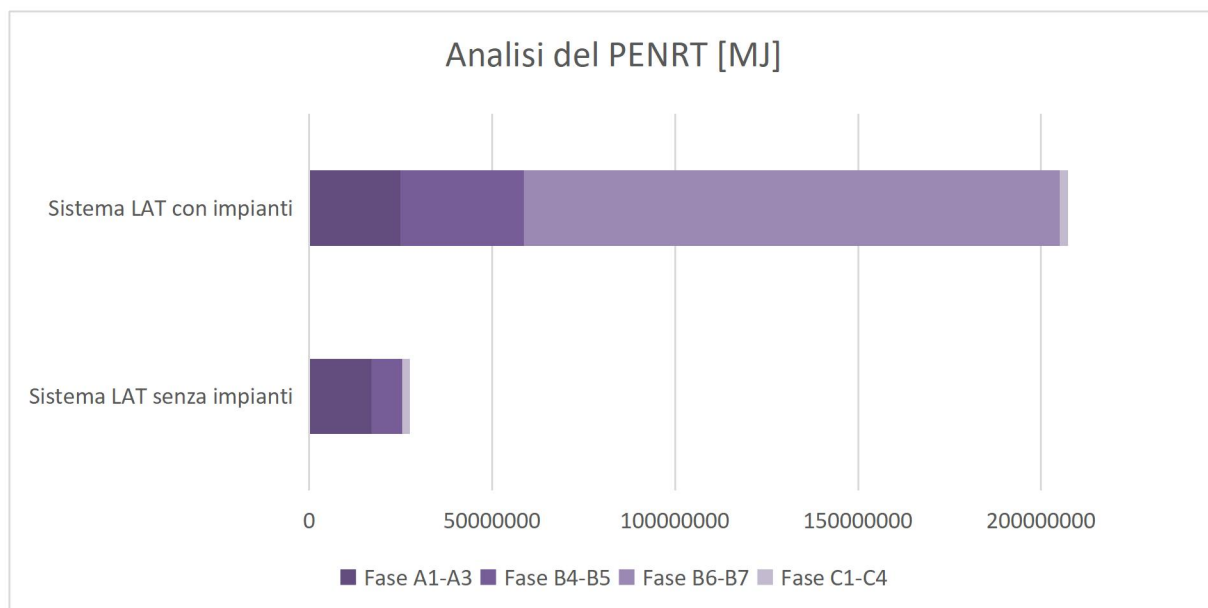


Grafico 14: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in laterizio rettificato - elaborazione dell'autore

L'analisi dei tre indicatori ambientali - GWP, PERT e PENRT - consente di delineare in modo chiaro il comportamento dei due sistemi costruttivi considerati, cioè quello con impianti e quello senza impianti, valutando allo stesso tempo il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita. In tutti i grafici emerge che la presenza degli impianti costituisce l'elemento maggiormente determinante nell'aumento degli impatti complessivi dell'edificio.

Nel sistema LAT con impianti, gli impatti risultano significativamente superiori in ciascun indicatore e mostrano un ordine di grandezza visivamente più elevato rispetto alla configurazione priva di impianti. Questo è attribuibile agli impianti stessi, che sono caratterizzati da materiali con un'alta energia incorporata e da processi produttivi molto impattanti. Inoltre, l'intero ciclo di vita degli impianti, che comprende manutenzioni, sostituzioni e consumi energetici durante l'uso, rappresenta un contributo ambientale molto rilevante, in particolare nelle fasi operative, cioè quelle appartenenti alla fase B.

Analizzando nel dettaglio le singole fasi del ciclo di vita, la fase A1-A3, relativa alla produzione dei materiali, rappresenta un contributo significativo in entrambi i sistemi, ma assume un peso superiore nella configurazione con impianti, poiché comprende la produzione delle componenti impiantistiche. La differenza tra i due sistemi diventa

ancora più marcata nella fase B4-B5, dove il sistema con impianti registra un incremento importante degli impatti dovuto alle sostituzioni periodiche degli apparati impiantistici, mentre nel sistema senza impianti tale voce risulta quasi trascurabile.

Il contributo più rilevante e differenziante è tuttavia legato alla fase B6-B7, che rappresenta l'energia operativa necessaria durante l'intero ciclo di vita. Nei grafici relativi a PERT e soprattutto a PENRT questa fase domina l'impatto totale del sistema con impianti, evidenziando come il fabbisogno energetico in esercizio rappresenti il principale responsabile dell'impatto ambientale. Nel sistema senza impianti, al contrario, questo contributo è pressoché assente, mostrando valori decisamente contenuti e legati quasi esclusivamente alle fasi A e C. Anche la fase C1-C4, relativa al fine vita, evidenzia scostamenti tra i due sistemi, con valori maggiori per la soluzione dotata di impianti, dovuta alla maggiore quantità e complessità dei materiali da smaltire. La fase D, che rappresenta la quantità derivante dal riciclo, ha un peso complessivamente modesto.

Le differenze tra i tre indicatori confermano l'importanza delle scelte impiantistiche nella valutazione complessiva. Il GWP è fortemente influenzato sia dall'energia dei materiali sia dalle emissioni legate ai consumi di esercizio, mostrando valori molto elevati soprattutto nella fase B6-B7 del sistema con impianti. Il PERT, che misura il consumo di energia primaria rinnovabile, evidenzia un andamento simile, ma con valori assoluti diversi. Il PENRT, infine, è l'indicatore in cui la differenza tra i due sistemi è più elevata; infatti la dipendenza dai materiali e dai consumi operativi non rinnovabili determina un incremento esponenziale nel sistema con impianti, rendendo questo grafico il più indicativo delle differenze tra i due sistemi.

4.7.2 Sistema con tamponamento blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato

Le stesse analisi effettuate sul sistema coi blocchi di laterizio rettificato sono state effettuate anche sul sistema coi blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato; quindi, per prima cosa si è effettuata l'analisi degli impatti ambientali Cradle to Cradle (A1 - D), come si può vedere nei primo grafici.

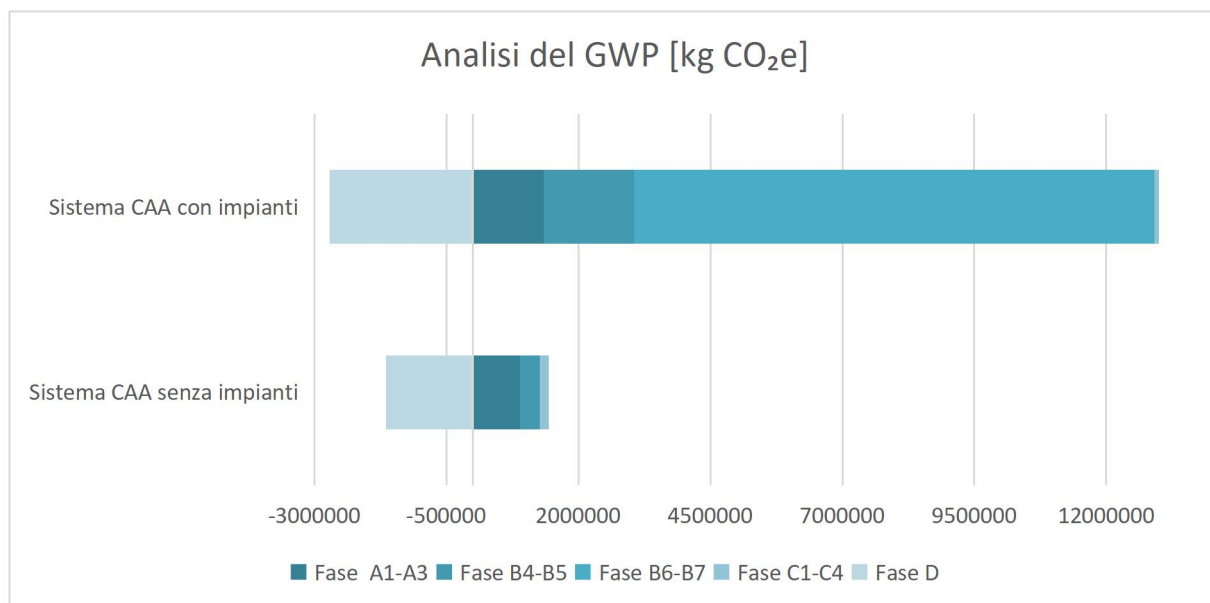


Grafico 15: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

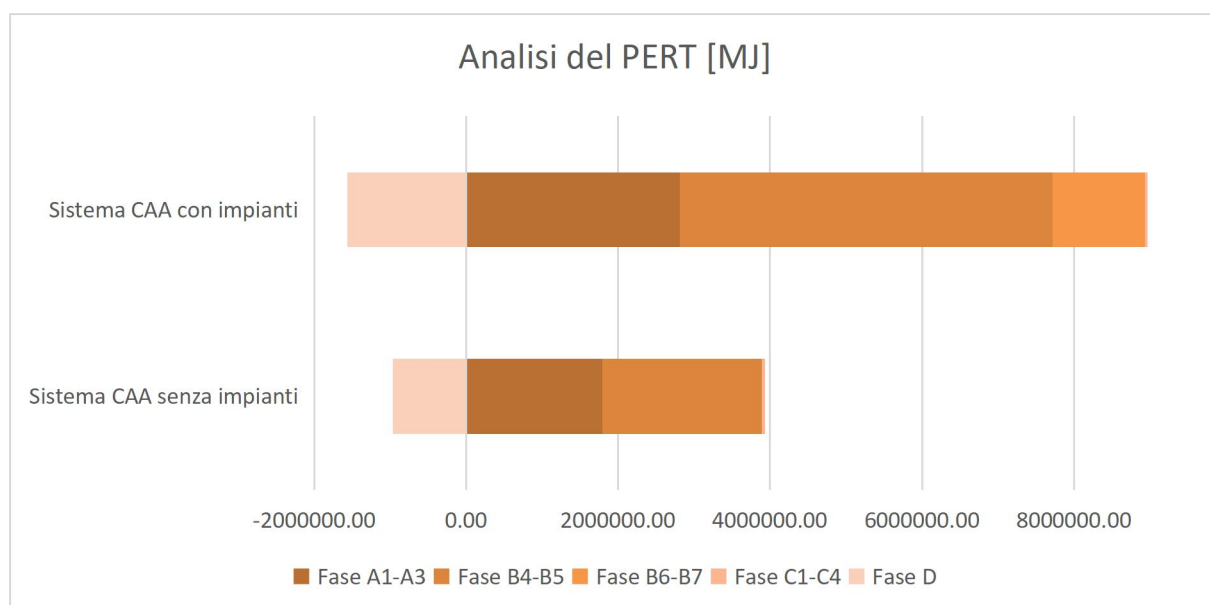


Grafico 16: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

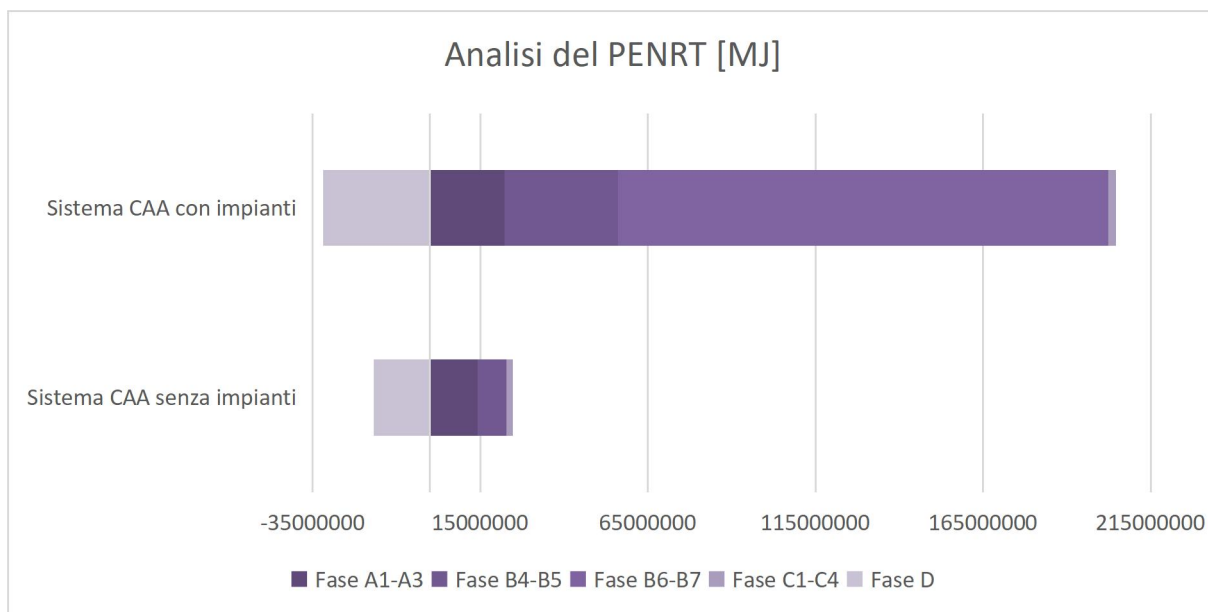


Grafico 17: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Dopodiché si è proceduto con l'analisi Cradle to Grave (A1 - C4) dei sistemi con blocchi in CCA.

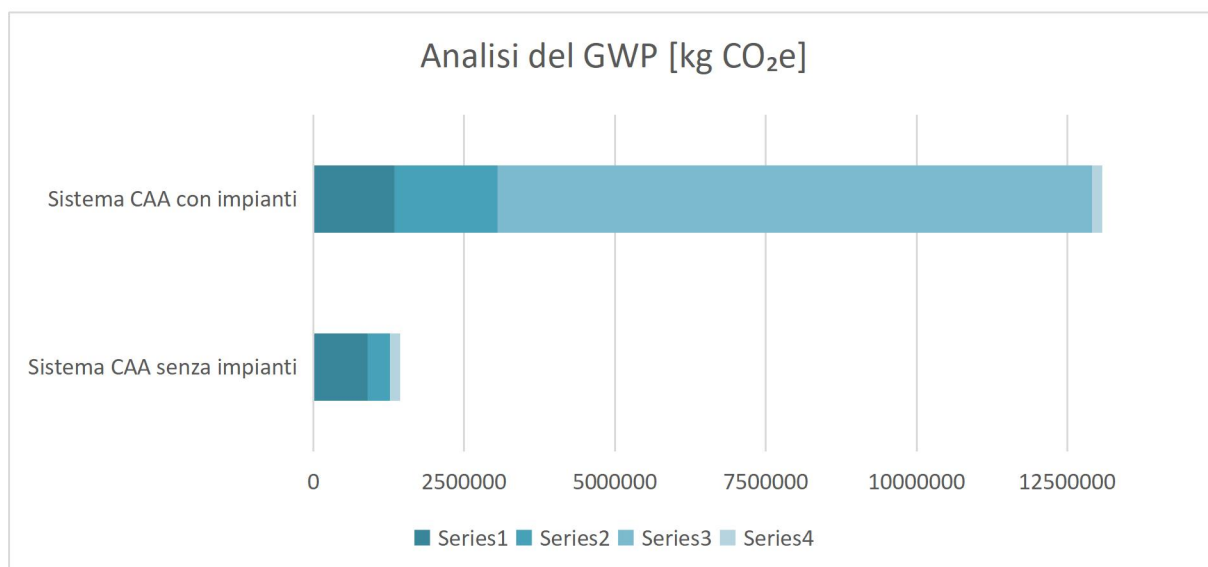


Grafico 18: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

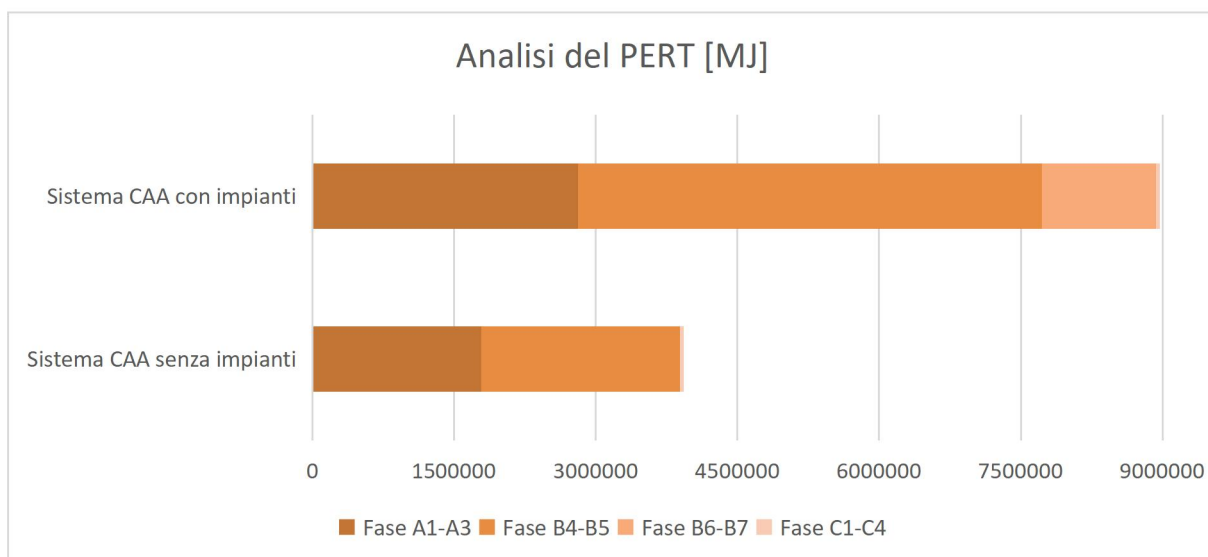


Grafico 19: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

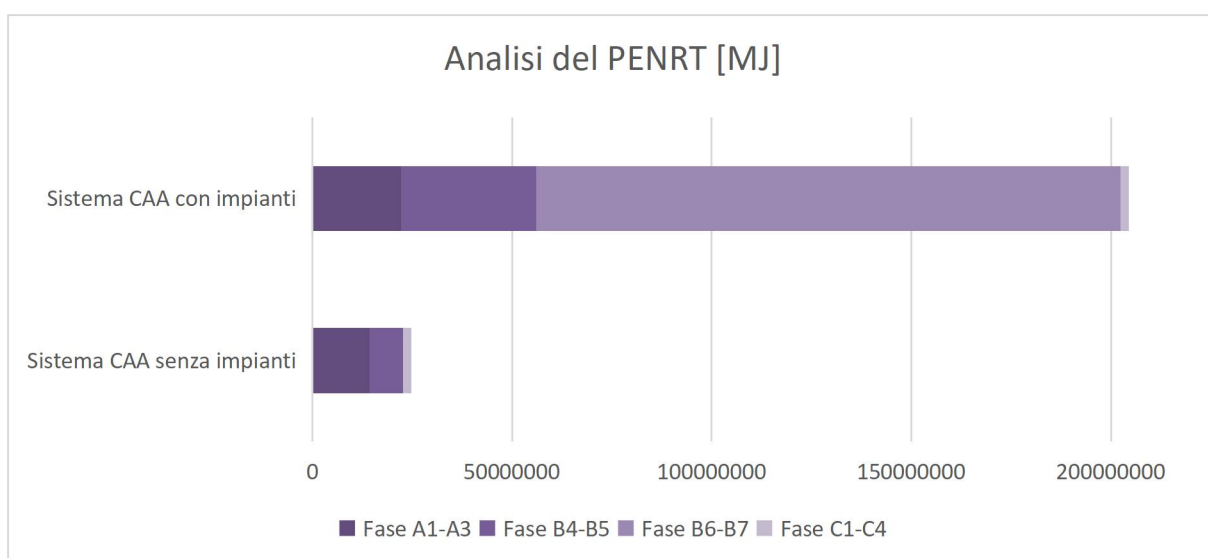


Grafico 20: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

Le analisi Cradle to Cradle e Cradle to Grave relative ai blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato confermano un andamento analogo a quello riscontrato per i blocchi di laterizio rettificato, ma con valori complessivamente più contenuti. Il CAA presenta infatti una minore energia incorporata e una densità inferiore, caratteristiche

che riducono gli impatti soprattutto nelle fasi iniziali del ciclo di vita. La differenza principale rimane quella tra sistemi con impianti e senza impianti: anche nel caso del CAA, la configurazione con impianti mostra impatti nettamente superiori in tutti gli indicatori (GWP, PERT e PENRT), sebbene con valori più bassi rispetto al laterizio.

Nella fase A1-A3, relativa alla produzione, il vantaggio del CAA è evidente: gli impatti sono inferiori rispetto al laterizio e ciò abbassa in generale il livello di partenza del sistema. Anche nelle fasi B4-B5 (manutenzioni e sostituzioni) si ritrova lo stesso trend osservato in precedenza: il sistema con impianti mantiene un impatto maggiore, ma su una scala più contenuta. La fase B6-B7 rimane la più significativa, con valori molto alti per il sistema con impianti e quasi nulli per quello senza. Le fasi C1-C4 risultano anch'esse meno impattanti rispetto al laterizio grazie al minor peso del materiale, mentre la fase D fornisce contributi limitati e proporzionati all'intero ciclo di vita.

Nel complesso, i sistemi in CAA ripropongono le stesse differenze tra configurazioni con e senza impianti già osservate per il laterizio, ma su valori ridotti. Il materiale contribuisce a contenere gli impatti nelle fasi iniziali e finali, mentre gli impianti restano l'elemento che determina la maggior parte degli impatti complessivi.

4.8 Confronto tra sistemi senza integrazione impiantistica

L'ultimo confronto effettuato in questa ricerca è stato quello tra il sistema costruttivo con il tamponamento in blocchi di laterizio rettificato e quello con il tamponamento in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato, ma in questo caso senza considerare la componente impiantistica, quindi solamente il materiale edile presente nelle strutture. Per cui si è partiti dall'analisi sugli impatti ambientali Cradle to cradle (A1 - D)

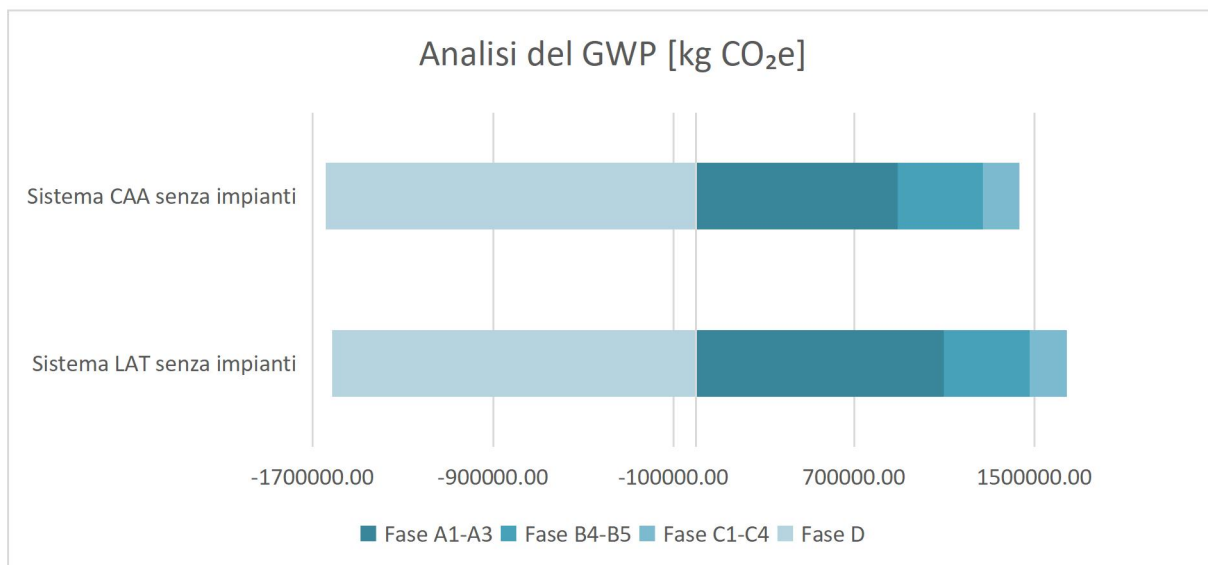


Grafico 21: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

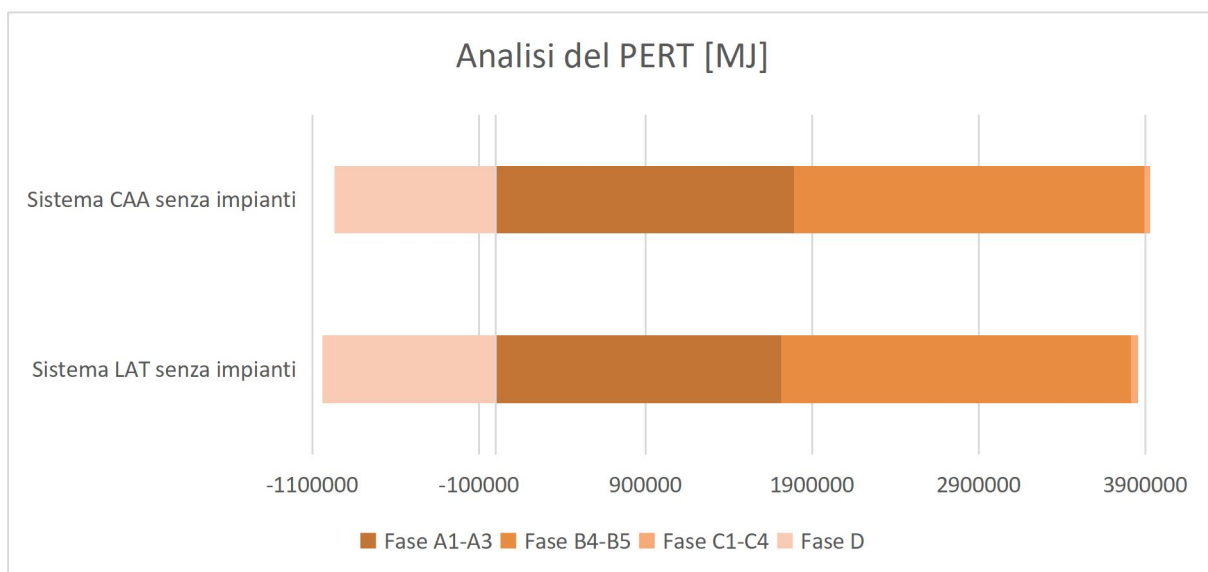


Grafico 22: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

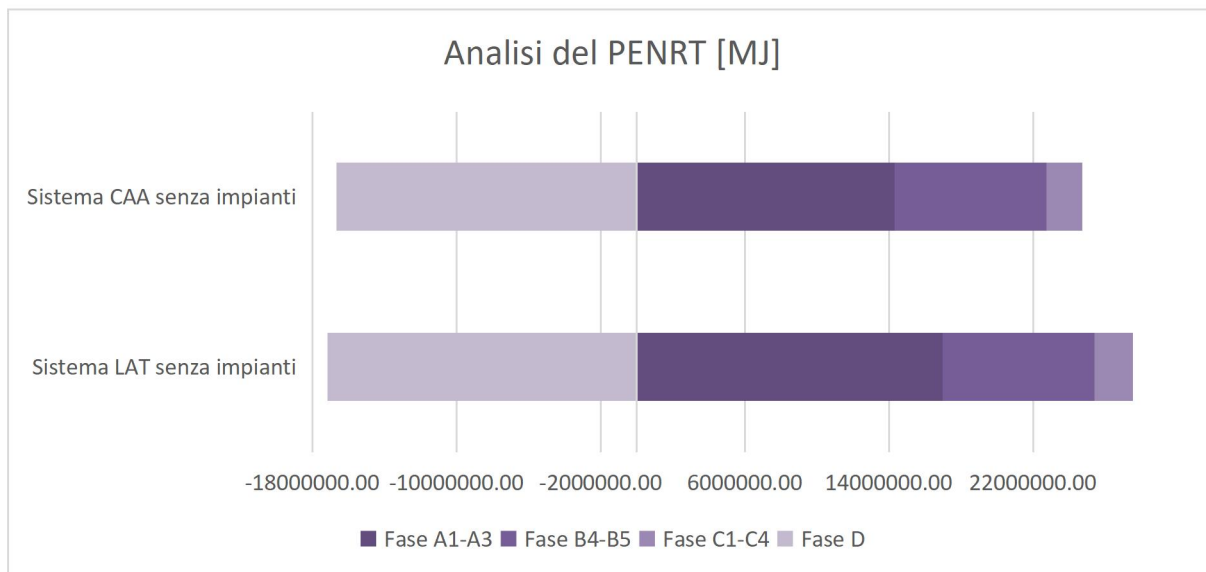


Grafico 23: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato -
elaborazione dell'autore

L'analisi evidenzia, anche in questo caso, come il CAA presenti impatti ambientali più contenuti in tutti gli indicatori, pur mantenendo una distribuzione delle fasi del ciclo di vita molto simile al laterizio. Le differenze derivano principalmente dalla minore energia incorporata del CAA, legata alla sua densità ridotta e al minor uso di materia prima, e da processi produttivi più efficienti. Anche nelle fasi finali di smaltimento il CAA risulta più vantaggioso grazie alla massa ridotta, che comporta minori consumi nei trasporti, nella demolizione e nella gestione del rifiuto. [15]

La fase più significativa è quella produttiva (A1-A3), dove il laterizio mostra impatti nettamente superiori per via della cottura ad alte temperature e dell'energia incorporata più elevata, mentre il CAA presenta valori sensibilmente inferiori in tutti gli indicatori. Nelle fasi di manutenzione e sostituzione (B4-B5) le differenze si attenuano, ma il laterizio rimane più impattante, coerentemente con la maggiore massa e la gestione più impegnativa dei materiali. Anche nella fase di fine vita (C1-C4) il CAA conserva un vantaggio, grazie a minori esigenze energetiche di movimentazione e trattamento. La fase D mostra contributi simili per entrambi i materiali, con una lieve differenza per il CAA, dovuta alla sua maggiore semplicità del riciclo. [15]

Osservando gli indicatori, il GWP evidenzia la massima differenza, con il laterizio

significativamente più emissivo in tutte le fasi, soprattutto in produzione. Il PERT mostra invece scarti più moderati, ma confermando il vantaggio del CAA. Nel grafico del PENRT invece aumenta di nuovo la distanza, questa è dovuta alla produzione del laterizio che richiede molta più energia non rinnovabile, mentre il CAA beneficia di processi meno energivori e di un minor uso di materia prima. [15]

Nel complesso, il CAA si dimostra più sostenibile lungo l'intero ciclo di vita: mantiene impatti inferiori rispetto al laterizio in tutte le categorie, con differenze particolarmente forti nella fase produttiva e nei consumi di energia non rinnovabile. La struttura del ciclo di vita rimane analoga, ma la natura del materiale rende il CAA più efficiente e ambientalmente vantaggioso.

Infine, si è conclusa la ricerca con l'analisi Cradle to Grave (A1 - C4)

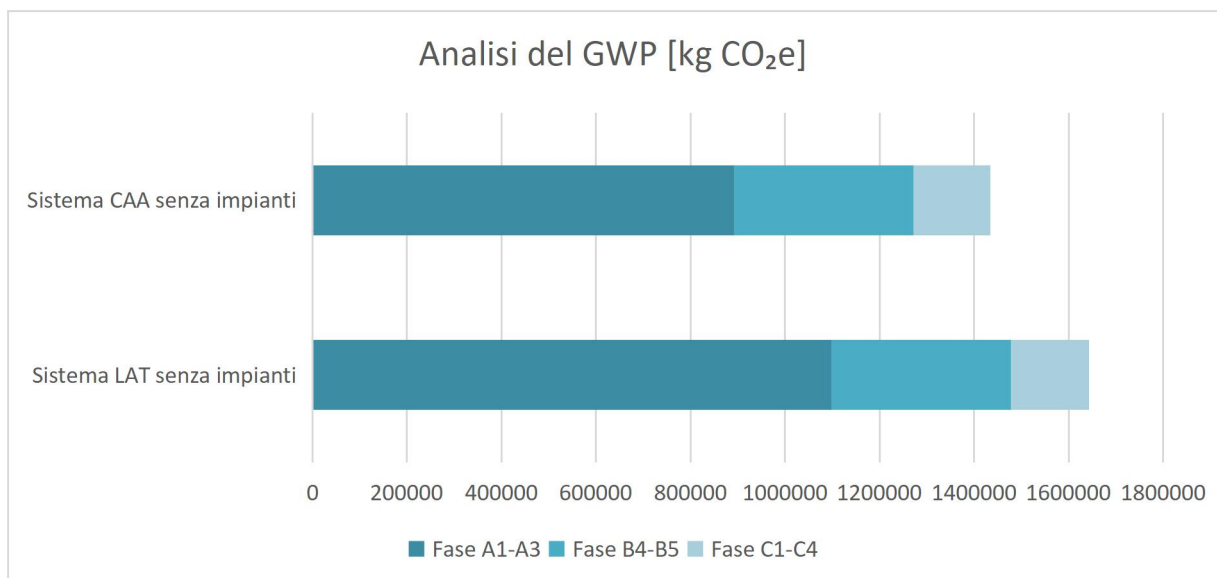


Grafico 24: Analisi del GWP nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

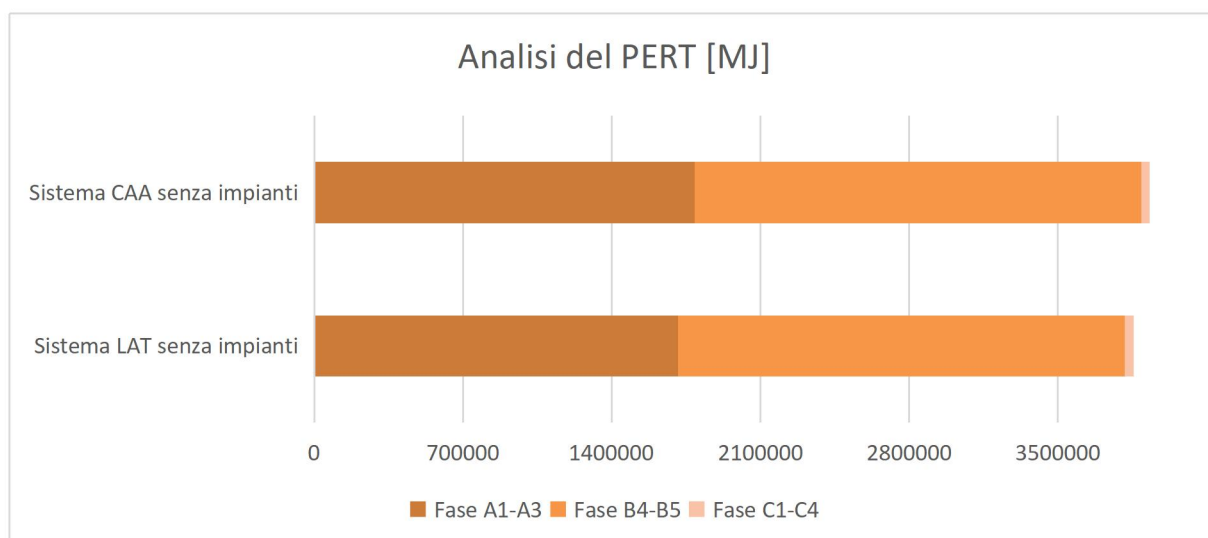


Grafico 25: Analisi del PERT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

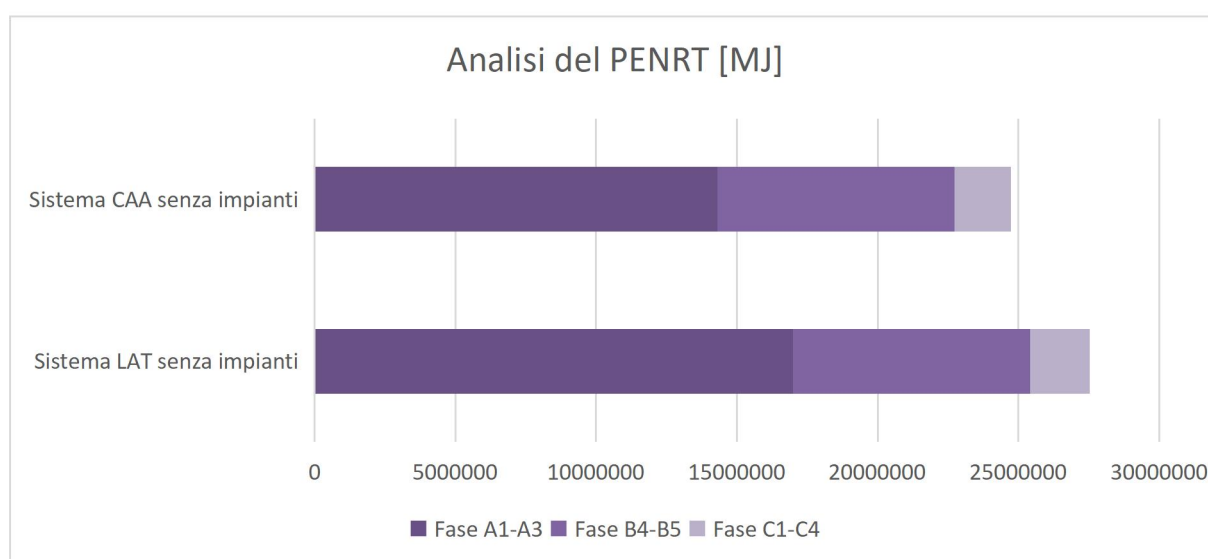


Grafico 26: Analisi del PENRT nel sistema con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato - elaborazione dell'autore

L'analisi dei grafici Cradle to Grave, quindi privi della fase D, conferma in modo ancora più netto le differenze strutturali tra laterizio rettificato (LAT) e calcestruzzo aerato autoclavato (CAA). Eliminando i valori del riciclo, che in entrambi i casi rappresentano un contributo minimo ma comunque più favorevole al CAA, il profilo

degli impatti risulta così più legato alle fasi A, B e C.

La lettura dei grafici evidenzia che il CAA mantiene impatti complessivamente inferiori in tutte le categorie ambientali (GWP, PERT e PENRT) e in tutte le fasi considerate. La fase produttiva (A1-A3) continua a rappresentare la principale area di distacco: il laterizio rimane più energivoro e più emissivo, mentre il CAA beneficia di massa ridotta e processi più efficienti. Nelle fasi d'uso e manutenzione (B4-B5) le differenze si riducono ma restano presenti, con valori leggermente superiori per il laterizio. Nella fase di fine vita (C1-C4), il CAA continua a mostrare impatti più bassi grazie alla sua leggerezza, che riduce consumi legati a demolizione e trasporto.

Confrontando i grafici con e senza la fase D, emerge che l'esclusione dei crediti finali accentua il divario tra i materiali: il laterizio risulta più penalizzato poiché non beneficia più, neppure in minima parte, dei modesti valori legati al suo recupero; il CAA, che aveva un vantaggio leggermente maggiore nella fase D, mostra ora differenze ancor più chiare nelle fasi A e C, che diventano predominanti nella lettura complessiva dei grafici. Per questi motivi, l'assenza della fase D non modifica l'andamento generale dei risultati, ma rende più evidente il confronto diretto tra i due materiali: il CAA rimane meno impattante, mentre il laterizio mostra valori più elevati in tutti gli indicatori e in tutte le fasi.

Concluse le analisi sul singolo edificio, è stato possibile proseguire con l'ultima fase di questo studio, cioè quella dell'applicazione dei risultati a tutto il lotto studiato; per cui estendendo le valutazioni ai 4 edifici si è potuto avere un bilancio dell'impatto totale dell'operazione di demolizione e ricostruzione. Per fare ciò sono state utilizzate delle semplificazioni, per cui i valori di impatto ambientale (GWP, PERT, PENRT) sono stati estesi agli altri edifici tramite il rapporto tra la somma delle superfici lorde degli edifici del lotto e la superficie lorda dell'edificio analizzato.

Dai grafici ottenuti si può vedere come i valori siano molto simili al ciclo di vita totale del singolo edificio. Infatti, in tutti i grafici emerge chiaramente il ruolo dominante della fase B6-B7, cioè la fase d'uso legata ai consumi energetici, questa componente sovrasta gli effetti delle altre fasi e rende marginali le differenze attribuibili al solo sistema costruttivo. Per cui, anche in questo caso, si può affermare che il CAA offre un lieve vantaggio nelle fasi iniziali di produzione, ma questo non incide in modo rilevante sul bilancio finale poiché la fase d'uso dell'edificio rimane il fattore determinante.

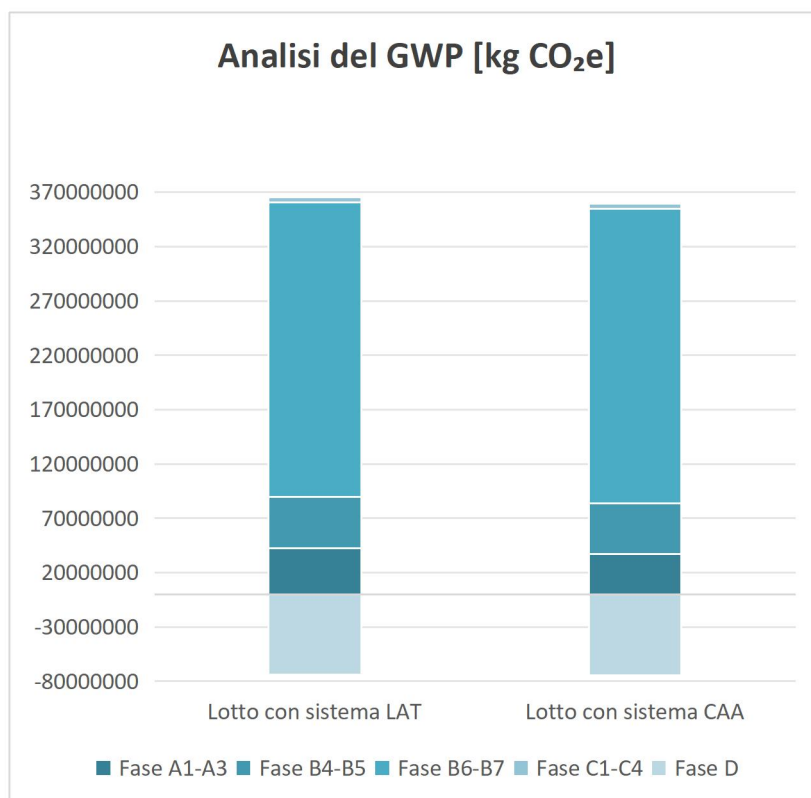


Grafico 27: Analisi del GWP del lotto - elaborazione dell'autore

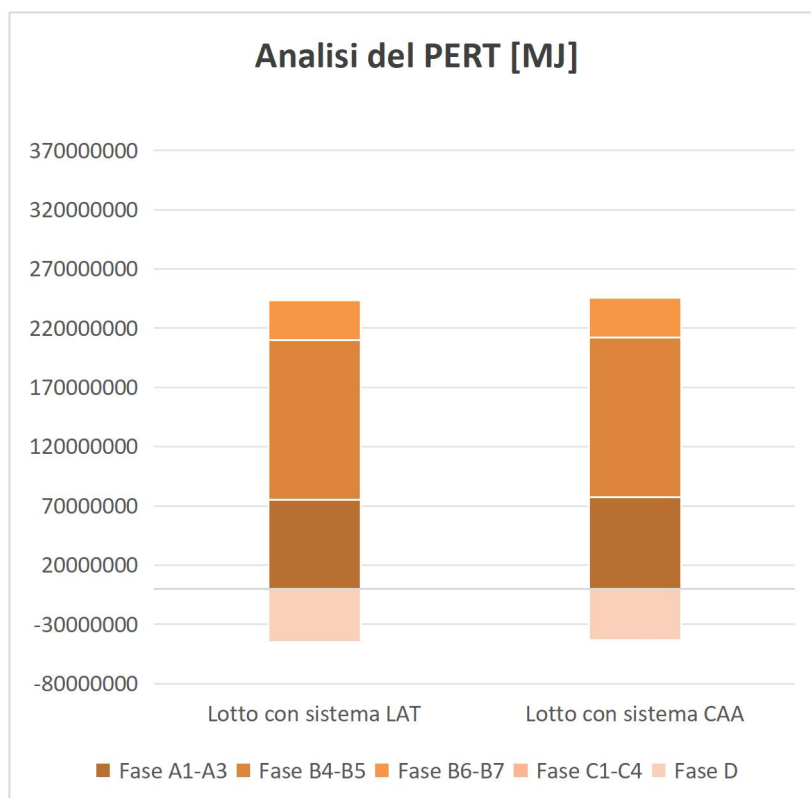


Grafico 28: Analisi del PERT del lotto - elaborazione dell'autore

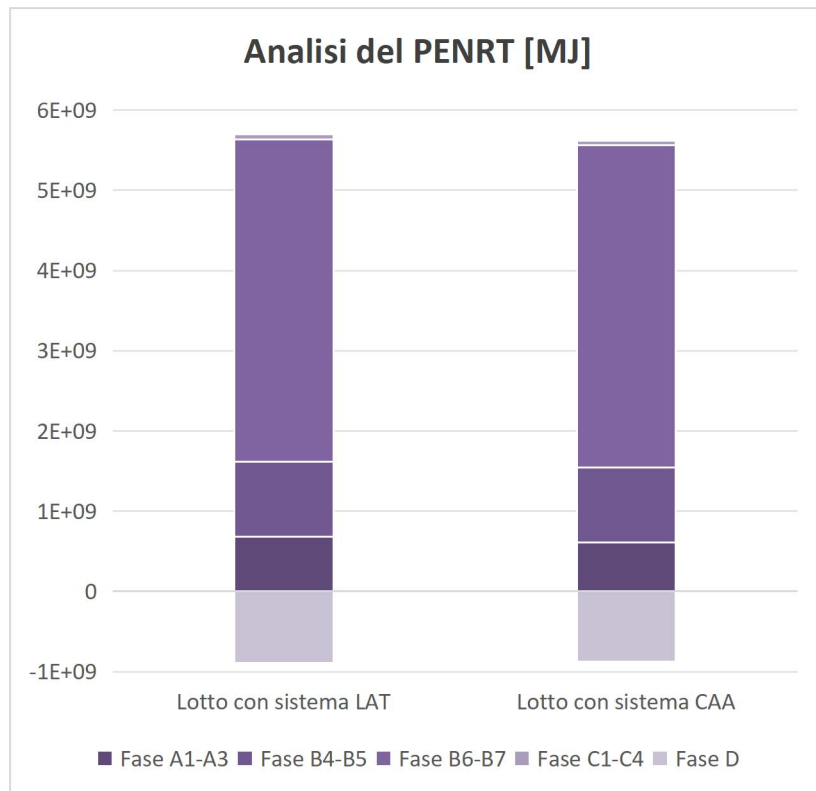


Grafico 29: Analisi del PENRT del lotto - elaborazione dell'autore

5. Conclusioni

Il patrimonio abitativo italiano realizzato nella seconda metà del Novecento presenta numerose criticità, dovute sia alle tecniche costruttive adottate in quel periodo sia al progressivo decadimento delle prestazioni degli edifici. Ampie porzioni del tessuto urbano richiedono quindi interventi di rinnovamento estesi e un punto di partenza può essere quello di operare alla scala dell'isolato.

Il presente lavoro di tesi mette a confronto due scenari progettuali differenti entrambi basati sull'impiego di sistemi costruttivi pesanti con struttura in telaio a calcestruzzo armato: una con tamponamenti in blocchi di laterizio rettificato e una con tamponamenti in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato.

Partendo dall'analisi di questi sistemi costruttivi, la tesi ha sviluppato un'ipotesi progettuale basata sulla demolizione e ricostruzione dell'intero isolato, con l'obiettivo di affrontare in modo organico le criticità riscontrate negli edifici esistenti. Le due soluzioni progettuali sono state valutate sia dal punto di vista energetico, mediante

simulazioni effettuate con il software EdilClima E700, sia sotto il profilo ambientale, attraverso l'analisi degli impatti condotta con OneClick LCA. Questo approccio integrato ha reso possibile confrontare in modo chiaro i benefici potenziali derivanti dalle due soluzioni costruttive esaminate.

Dalle analisi emerge con coerenza come il CAA risulti complessivamente più sostenibile in tutte le categorie d'impatto esaminate (GWP, PERT, PENRT). Le differenze maggiori si concentrano nella fase produttiva (A1–A3), dove il laterizio presenta valori nettamente più elevati a causa dei processi di cottura ad alta temperatura e dell'energia incorporata superiore. Il CAA, grazie alla sua minore densità, alla struttura porosa e ai processi produttivi meno energivori, evidenzia impatti sensibilmente più contenuti, rappresentando una soluzione più efficiente e più vantaggiosa dal punto di vista ambientale. Anche nelle fasi finali del ciclo di vita (C1–C4) il CAA conferma un comportamento più favorevole, infatti, la massa ridotta comporta minori consumi di energia nelle operazioni di demolizione, trasporto e gestione del rifiuto. L'eliminazione dei benefici del riciclo (D) nel passaggio da un approccio all'analisi di tipo Cradle to Cradle a quello di tipo Cradle to Grave rende ancor più evidenti le differenze strutturali tra i due materiali, accentuando il divario delle fasi iniziali e di smaltimento.

Allo stesso tempo, lo studio ha evidenziato il ruolo determinante della componente impiantistica che mostra impatti significativamente maggiori in tutti gli indicatori, indipendentemente dal materiale utilizzato. Le fasi B6–B7, in particolare, rappresentano l'origine dei maggiori contributi ambientali, confermando che gli impianti incidono più dei tamponamenti nella valutazione complessiva dell'edificio. Nei sistemi senza impianti, invece, la differenza tra CAA e laterizio rimane più immediata e riconducibile alle sole caratteristiche dei materiali. L'analisi estesa all'intero lotto edilizio ha permesso infine di estendere gli impatti del singolo edificio su scala più ampia.

In conclusione, la ricerca conferma che il calcestruzzo aerato autoclavato rappresenta una soluzione costruttiva più sostenibile rispetto al laterizio rettificato, mantenendo impatti inferiori in tutte le principali fasi del ciclo di vita e nelle diverse configurazioni analizzate. Le sue caratteristiche, densità ridotta, minore energia incorporata, buona durabilità e una migliore gestione del fine vita, lo rendono un materiale adatto a strategie di edilizia responsabile e orientata alla riduzione degli impatti ambientali. Allo stesso tempo, lo studio sottolinea la necessità di considerare

con attenzione la componente impiantistica, che costituisce l'elemento più influente nel bilancio complessivo. In una prospettiva di studi futuri, per ottimizzare questo contributo dei sistemi impiantistici, si potrebbe valutare l'adozione di blocchi di maggiore spessore, sia in laterizio sia in calcestruzzo, per le pareti esterne. Questo espediente potrebbe contribuire a ridurre l'energia richiesta dagli impianti, mitigando così l'elevato impatto ambientale associato.

Bibliografia generale

- [1] Costantino. C.; Benedetti, A.C.; Gulli, R.; Predari G.; *The Process of Digitalization of the Urban Environment for the Development of Sustainable and Circular Cities: A Case Study of Bologna, Italy*, *Sustainability* 2022, 14(21), 13740; <https://doi.org/10.3390/su142113740>
- [2] Anna Chiara Benedetti, Carlo Costantino, Rocco Lobosco, Giorgia Predari, Riccardo Gulli; *Comparative LCA Scenarios for Urban Regeneration of Residential Building Stock. Application to an Existing High-density Urban Block in Bologna*, *Energy and Buildings*, Volume 329, 15 February 2025, 115270; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115270>
- [3] Costantino, C.; Benedetti, A.C.; Gulli, R.; *Simplified Multi – Life Cycle Assessment at the Urban Block Scale: GIS – Based Comparative Methodology for Evaluating Energy Efficiency Solutions*, *Buildings* 2023, 13(9), 2355; <https://doi.org/10.3390/buildings13092355>
- [4] Costantino. C.; Bigiotti, S.; Marucci A.; Gulli, R.; *Long-Term Comparative Life Cycle Assessment, Cost, and Comfort Analysis of Heavyweight vs. Lightweight Construction Systems in a Mediterranean Climate*, *Sustainability* 2024, 16(20), 8959; <https://doi.org/10.3390/su16208959>
- [5] Wienerberger; *Sistema Completo Porotherm*.
- [6] Xella, Multipor, Ytong; *Manuale Tecnico: Sistemi in calcestruzzo areolare*.
- [7] R. Lobosco; *Riqualificazione energetica vs. interventi di sostituzione Analisi comparativa del ciclo di vita e simulazioni energetiche di un isolato urbano a Bologna. Tesi di laurea, a.a. 2022/2023*.
- [8] Anna Chiara Benedetti, Carlo Costantino; *Ri-costruire per Ri-generare un modello per le periferie urbane, Design and construction Tradition and innovation in the practice of architecture / Progetto e Costruzione Tradizione ed innovazione nella pratica dell'architettura*, 2021.
- [9] E. Serafin; *Detailed comparison between two different HVAC solutions in two blocks of residential buildings: cost-benefit analysis and energy performance evaluation. Tesi di laurea, a.a. 2023/2024*.
- [10] OneClick; <https://oneclicklca.com/it/>
- [11] Enrico Dassori, Renata Morbiducci; *Memoria e Innovazione. 7-10 settembre 2022 Organizing Institution: University of Genoa – Department of Architecture and Design*.
- [12] Decreto-legge n.76 del 16/7/2020. Art. 10. Semplificazione e altre misure in materia d'edilizia.

- [13] Raj, A., Borsaikia, A. C., & Dixit, U. S. (2020). *Physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (AAC) used in the building wall system: A review*. *Manufacturing Technology Today*, 19(12), 9–18. Retrieved from <https://mtt.cmti.res.in/index.php/journal/article/view/95>
- [14] Paulo B. Lourenco, Francisco M. Fernandes, Fernando Castro; *Handmade Clay Bricks: Chemical, Physical and Mechanical Properties*. January 2010, *International Journal of Architectural Heritage* 4(1):38-58, DOI:10.1080/15583050902871092
- [15] Paul A, Dey P, Dhar M.; *Physico-mechanical properties of autoclaved aerated concrete block as an alternative to traditional bricks*. *Res. Eng. Struct. Mater.*, 2025; 11(5): 1965-1980. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2025-392me0811rs>
- [16] Falco, E.; Garda, E.; Zardo, L.; Cortinovis, C. *Learning from Two Early Brownfield Redevelopment Projects in Italy: Soil Desealing, Cooling Effects, and Implementation of Nature-Based Solutions Through Traditional Planning Tools*. *Land* 2024, 13, 1700. <https://doi.org/10.3390/land13101700>
- [17] Nicola Damato: *Consumo di suolo, nel 2024 toccato il massimo degli ultimi 12 anni*. 29/10/2025, https://www.edilportale.com/news/2025/10/ambiente/consumo-di-suolo-2024-dati-ispra-impatti-e-norme_107681_52.html?utm_source=chatgpt.com
- [18] Caselli, B., Ceci, M., De Noia, I., Garda, E., Zazzi, M. (2024). *Towards the Integration of Soil Desealing in the Urban Areas' Transformation Processes*. In: Marucci, A., Zullo, F., Fiorini, L., Saganeiti, L. (eds) *Innovation in Urban and Regional Planning. INPUT 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 467. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54118-6_27
- [19] Open Data; <https://opendata.comune.bologna.it/pages/home/>