

Domenico D'Olimpio, <https://orcid.org/0000-0001-9760-5548>

Valeria Cecafozzo, <https://orcid.org/0000-0003-3404-1321>

Gaia Turchetti, <https://orcid.org/0000-0001-6746-0544>

Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, Sapienza Università di Roma, Italia

domenico.dolimpio@uniroma1.it

valeria.cecrafozzo@uniroma1.it

gaia.turchetti@uniroma1.it

Abstract. Il patrimonio edilizio italiano affronta sfide di inefficienza energetica, con il 70% degli edifici prossimi alla fine del ciclo vitale. Servono interventi urgenti di riqualificazione e *retrofitting* tecnologico per migliorarne le prestazioni. Normative come l'EPBD IV puntano a trasformare gli edifici esistenti in NZEB entro il 2050. La ricerca indaga sistemi e tecnologie innovative, ispirandosi al modello "Energiesprong", per interventi di deep retrofit. Il progetto pilota nel quartiere "Le Terrazze" a Castelnuovo di Porto dimostra l'efficacia delle soluzioni proposte, prevedendo il raggiungimento di significativi miglioramenti energetici e ambientali attraverso una importante riduzione delle lavorazioni in opera e secondo tempistiche realizzative drasticamente ridotte.

Parole chiave: Bioclimatic design; Climate change mitigation; Decarbonising Buildings in Cities; Off-site retrofitting technology.

Introduzione

L'attenzione rivolta al settore edilizio, responsabile di quasi il 40% dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂ eq, si è spostata nel tempo dal singolo edificio a gruppi di edifici, quindi a interi quartieri, nonché da un approccio "energia quasi zero" a concetti più rigorosi di "energia positiva" e "neutralità carbonica". Tali obiettivi possono essere perseguiti ricercando un *Whole Life Carbon* ovvero una contabilizzazione delle emissioni di CO₂ equivalenti nel ciclo di vita di un manufatto. Ciò mira alla valutazione sia delle emissioni di *Embodied Carbon* sia di quelle associate all'uso di un edificio (*Operational Carbon*) e determinate in funzione dei fabbisogni energetici (prevalentemente per la climatizzazione, l'illuminazione e l'acqua calda sanitaria). Mancano, tuttavia, solide basi comuni e possono identificarsi lacune nelle definizioni e nei quadri politici necessari a governare appieno questi processi. (Direttiva 2024/1275 – EPBD IV; Causone *et al.*, 2021; Satola *et al.*, 2021; Lützkendorf *et al.*, 2020).

Il patrimonio edilizio esistente in Italia presenta condizioni spesso critiche di conservazione, inefficienza e incompatibilità ambientale. Tali criticità, strettamente legate al metabolismo edilizio e agli elevati consumi energetici, contribuiscono in maniera significativa alle emissioni di gas climalteranti e all'inquinamento atmosferico. Attualmente circa il 70% del patrimonio edilizio italiano si avvicina alla fine del proprio ciclo di vita funzionale, rendendo urgente un intervento sistematico per ridurre la vulnerabilità sismica, migliorare l'efficienza energetica e affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici. La necessità di operare in questa direzione è confermata dalla Direttiva UE EPBD IV (2024/1275) che pone l'obiettivo di decarbonizzazione del parco edilizio entro il 2050 attraverso interventi mirati di ristrutturazione profonda (*deep retrofit*).

Il deep retrofit non si limita a ridurre il consumo energetico degli edifici esistenti ma promuove un miglioramento complessivo delle loro prestazioni, comprendendo aspetti come il comfort abitativo, la gestione sostenibile delle risorse e l'ottimizzazione dell'impatto ambientale (Zivhov and Rudiger, 2020). Infatti, la EPBD IV sottolinea che per raggiungere la prospettiva al 2050 di un parco immobiliare decarbonizzato sia necessario andare oltre le emissioni operative di gas a effetto serra sulle quali attualmente si concentra l'attenzione, ovvero sia necessario leggere la *deep renovation* come una ristrutturazione che trasforma gli edifici in organismi edilizi a emissioni zero.

La necessità di sottolineare le giuste spinte verso un futuro prossimo ma anche di enfatizzare le esigenze cogenti è determinata dalla considerazione che, a fronte dell'alto tasso di inefficienza

Technological
retrofitting for carbon-
neutral districts:
New approaches in
bioclimatic design

Abstract. The Italian building stock faces significant challenges in energy inefficiency, with 70% of buildings nearing the end of their life cycle. Urgent interventions are required for refurbishment and technological retrofitting to enhance performance. Regulations such as the EPBD IV aim to transform existing buildings into NZEBs by 2050. This research explores innovative systems and technologies inspired by the "Energiesprong" model to enable deep retrofit interventions. The pilot project in the "Le Terrazze" district of Castelnuovo di Porto demonstrates the effectiveness of the proposed solutions, achieving substantial energy and environmental improvements while significantly reducing on-site construction activities and drastically shortening implementation timelines.

Keywords: Bioclimatic design; Climate change mitigation; Decarbonising Buildings in Cities; Off-site retrofitting technology.

Introduction

The existing building stock, with the exception of new constructions from the past two decades – particularly those built after Legislative Decree 192 of 2005, which was the first in Italy to specifically regulate the physical and technical characteristics of building envelopes (e.g., the thermal transmittance of walls, roofs, windows, etc.), largely presents inadequate and, in some respects, alarming conditions. These concerns primarily relate to the conservation status, environmental incompatibility, and the emissions of pollutants and climate-altering substances produced by the building's energy consumption and metabolic processes, as well as its impact on indoor comfort.

Attention to the building sector, which accounts for nearly 40% of energy consumption and CO₂ equivalent emis-

sions, has shifted over time from a focus on individual buildings to clusters of buildings and entire neighbourhoods. This evolution has moved beyond "nearly zero energy" approaches to embrace more ambitious concepts such as "positive energy" and "carbon neutrality." Achieving these goals requires adopting a Whole Life Carbon perspective, which considers both Embodied Carbon emissions and Operational Carbon emissions associated with building use (primarily for heating, cooling, lighting, and hot water). However, the sector continues to lack consistent foundational methodologies, and gaps remain in definitions and policy frameworks to fully address these processes (Directive 2024/1275 – EPBD IV; Causone *et al.*, 2021; Satola *et al.*, 2021; Lützkendorf *et al.*, 2020). The existing Italian building stock frequently displays critical issues related

del parco edilizio, il tasso ponderato annuo di ristrutturazione energetica è intorno all'1%, largamente inadeguato rispetto alle esigenze, e che presumibilmente l'85-95% degli edifici attualmente esistenti sarà ancora presente nel 2050. Queste problematiche strutturali si intrecciano con un contesto economico caratterizzato da una progressiva contrazione degli investimenti nel settore delle costruzioni, accentuando la necessità di implementare strategie normative e operative per incentivare la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, verso il miglioramento delle prestazioni energetiche e ambientali, l'innalzamento della sicurezza sismica e fruitiva, e l'adeguamento a standard architettonici moderni.

Nell'ambito delle strategie di rigenerazione urbana le operazioni di riqualificazione e di recupero in chiave bioecologica e di efficienza energetico-ambientale del patrimonio edilizio esistente sono di fondamentale importanza per il nostro sistema ambientale, di livello biofisico, microclimatico e antropico da conseguire con soluzioni tecnologiche innovative. La ricerca deve interfacciarsi con la complessità degli interventi sul patrimonio edilizio, in termini di azioni programmatiche e strategiche nonché di confronto con le dinamiche politiche, sociali ed economiche. Diventa pertanto imprescindibile «attribuire valore ai processi di innovazione tecnologica, veicolati secondo una serie di driver (come la messa in sicurezza, l'efficienza energetica, la conversione *green*, ecc.), favorendo, ad esempio tramite requisiti cogenti e/o premiali, l'offerta di prodotti e servizi ad alto valore aggiunto in termini di prestazioni eco-compatibili, ottimizzazione dell'uso delle risorse e riduzione degli sprechi» (Tucci, 2018). L'applicazione di «tecnologie riconfiguranti» (D'Olimpio, 2023) ovvero di tecnologie attraverso la cui applicazione ed integra-

zione all'edificio, si va a modificare la sua configurazione a differenti livelli: architettonico, fisico-costitutivo, impiantistico, rappresenta un ulteriore passo avanti nella riqualificazione degli edifici esistenti, in quanto vengono superati i limiti delle tecniche tradizionali con soluzioni eco-compatibili e innovative mirando a una trasformazione integrale degli edifici coinvolgendo gli aspetti architettonici, strutturali e impiantistici.

Questo approccio olistico permette di rispondere a obiettivi multidimensionali, come l'efficienza energetica, la riduzione dell'impatto ambientale e il miglioramento del comfort abitativo. La loro applicazione si rivela particolarmente efficace nei contesti edilizi caratterizzati da scarsi livelli prestazionali energetico-ambientali, dove i benefici del deep retrofit sono maggiormente evidenti.

Strategie per il retrofitting sostenibile

nei Paesi Bassi. Esso prevede una gestione industrializzata del processo di riqualificazione attraverso soluzioni prefabbricate *off-site*. Elementi come pannelli prefabbricati completi di serramenti e impianti vengono realizzati in stabilimenti, trasportati in cantiere e installati rapidamente, consentendo tempi di intervento ridotti e un miglioramento drastico delle prestazioni energetiche senza interrompere l'uso abitativo dell'edificio. Questo modello ha già permesso la riqualificazione di numerose abitazioni nei Paesi Bassi e si sta diffondendo in Germania, Francia e Regno Unito, con risultati positivi sia in termini economici che ambientali.

Il processo di prefabbricazione *off-site* offre notevoli vantaggi: ottimizza i tempi di produzione e installazione e consente si-

Tra gli approcci più efficaci per il deep retrofit si distingue il modello Energiesprong sviluppato

to conservation, inefficiency, and environmental incompatibility. These problems, which are intrinsically linked to the metabolic processes of buildings and high energy consumption, significantly contribute to greenhouse gas emissions and air pollution. Approximately 70% of Italy's building stock is nearing the end of its functional life cycle, underscoring the urgent need for systematic interventions to reduce seismic vulnerability, enhance energy efficiency, and address climate change challenges. This imperative is reinforced by the EPBD IV Directive (2024/1275), which seeks to decarbonise the building stock by 2050 through targeted deep retrofit interventions. Deep retrofitting goes beyond merely reducing energy consumption in existing buildings. It facilitates comprehensive improvements in performance. These include enhanced living com-

fort, sustainable resource management, and minimised environmental impact (Zivhiv and Rudiger, 2020). The EPBD IV emphasises that achieving a decarbonised building stock by 2050 requires addressing not only operational greenhouse gas emissions but also reimagining deep renovation as a transformative process, converting buildings into zero-emission entities. This urgency is further compounded by the sector's inefficiency, with an annual weighted rate of energy renovation at approximately 1%, a figure grossly insufficient to meet current objectives. Moreover, it is estimated that 85-95% of existing buildings will remain in use by 2050. Structural challenges are exacerbated by an economic context of declining investment in the construction sector, highlighting the critical need for regulatory and operational strategies to incentivise the re-

habilitation of existing building stock. These strategies aim to improve energy and environmental performance, enhance seismic safety and usability, and align structures with modern architectural standards.

Urban regeneration strategies prioritise bioecological and energy-efficient rehabilitation of the existing building stock as essential to preserving environmental, biophysical, microclimatic, and human systems. These objectives can be achieved through innovative technological solutions. Research must address the complexity of interventions within the built environment, encompassing programmatic and strategic actions as well as interactions with political, social, and economic dynamics. This necessity underscores the importance of fostering technological innovation processes driven by imperatives such as safety, energy

efficiency, and green conversion. Such efforts can promote the development and adoption of high value products and services characterised by eco-compatibility, resource optimisation, and waste reduction (Tucci, 2018).

The application of "reconfiguring technologies" (D'Olimpio, 2023) that, through their implementation and integration into a building, modify its configuration on various levels, including architectural, physical-structural, and systems marks a significant advancement in the refurbishment of existing buildings. These technologies transcend the limitations of traditional methods by offering eco-compatible and innovative solutions aimed at achieving a comprehensive transformation of buildings, addressing architectural, structural, and system-related aspects.

This holistic approach enables the attainment of multidimensional ob-

gnificativi risparmi sia dal punto di vista economico sia in termini di emissioni di CO₂ (Guo *et al.*, 2023; Ruoyu *et al.*, 2020). Si stima una riduzione fino al 30% dei costi del progetto grazie alla tecnologia digitale e alla produzione off-site; una riduzione del 40% dei ritardi del progetto tramite pianificazione integrata e in tempo reale; una riduzione dell'80% dei rifiuti edili e delle rilavorazioni, con benefici diretti anche in termini di sostenibilità ambientale; un aumento fino al 25% delle esportazioni di prodotti edili e servizi (Building 4.0 CRC, 2024). La produzione prefabbricata permette di ridurre significativamente gli sprechi dei materiali rispetto ai metodi tradizionali grazie al controllo delle operazioni in ambienti industrializzati e all'ottimizzazione dell'uso delle risorse. Inoltre, i protocolli di interoperabilità e la condivisione di dati tra i vari attori del processo consentono una maggiore efficienza operativa e una riduzione degli errori.

Il contenimento delle emissioni di CO₂ lungo il ciclo di vita dell'edificio è una sfida fondamentale per il settore edilizio. Una delle prove più promettenti è il riuso degli elementi tecnologici esistenti, con particolare attenzione all'involucro edilizio il quale viene lasciato sostanzialmente inalterato e migliorato attraverso l'addizione di un secondo involucro realizzato *off-site* per aumentarne l'efficienza energetica. Questo approccio consente altresì una riduzione sostanziale delle emissioni di CO₂ legate alla fase costruttiva, in quanto limita i trasporti dei materiali, la produzione di rifiuti e le rilavorazioni in cantiere. Il modello potrebbe favorire la transizione verso un'edilizia più sostenibile contribuendo al raggiungimento degli obiettivi climatici europei e generando al contempo nuove opportunità economiche per il settore.

jectives, such as energy efficiency, reduced environmental impact, and improved living comfort. Their application is particularly effective in building contexts featuring low energy and environmental performance, where the benefits of deep retrofit interventions are most pronounced.

Strategies for sustainable retrofitting

One of the most effective approaches to deep retrofitting is the Energiesprong model, developed in The Netherlands. This method employs an industrialised approach to retrofitting using off-site prefabricated solutions. Components such as prefabricated panels with integrated windows and systems are manufactured in factories, transported to the site, and swiftly installed, significantly reducing intervention times and drastically improving energy performance without disrupt-

ing building occupancy. The model has successfully retrofitted numerous homes in The Netherlands, and is now being adopted in Germany, France, and the United Kingdom, delivering positive economic and environmental outcomes.

The off-site prefabrication process offers substantial advantages, including optimised production and installation times, as well as significant cost and CO₂ emission reductions (Guo *et al.*, 2023; Ruoyu *et al.*, 2020). Digital technologies and off-site production methods can decrease project costs by up to 30%, reduce project delays by 40% through real-time integrated planning, and cut construction waste and rework by 80%, thereby contributing to environmental sustainability (Building 4.0 CRC, 2024). Furthermore, prefabrication minimises material waste through controlled opera-

Articolazione metodologica della ricerca

La metodologia della ricerca si articola in quattro fasi principali: analisi, sviluppo di un modello, sperimentazione su un caso pilota, valutazione critica dei risultati.

1. **Analisi:** Questa fase è svolta su due fronti. Da un lato è stata condotta un'analisi delle principali tecnologie, sistemi e componenti che rientrano nelle logiche di *Offsite*, *Industrialized Building* e *Modern Method Construction* (MMC). Dall'altro è stato condotto un esame critico delle tecnologie bioclimatiche responsive, adatte e/o adattabili principalmente al concetto di *off-site*. Questo esame è stato svolto anche alla luce della necessità di minimizzare il consumo di materiali e incrementare l'uso di materiali riciclati come indicato dai Criteri Ambientali Minimi (CAM). Sono stati analizzati progetti esemplari di retrofitting energetico che integrano il design bioclimatico e l'uso di fonti rinnovabili all'interno di processi avanzati di prefabbricazione leggera valutando i risultati in termini di riduzione dei consumi energetici e decarbonizzazione.
2. **Sviluppo di un modello:** Sulla base dell'analisi del quadro normativo e delle sperimentazioni in corso è stato sviluppato un modello funzionale alle specifiche esigenze climatiche di contesto. Tale modello mira a integrare le soluzioni più efficaci adattate alle condizioni del territorio. Si tratta di un approccio metodologico che include un quadro dettagliato delle tecnologie e delle pratiche più promettenti per la neutralità climatica insieme a raccomandazioni operative per i progettisti.

L'analisi ha riguardato sia il sistema tridimensionale dell'involucro sia i singoli componenti e materiali, con l'obiettivo di:

tions in industrialised environments and resource optimisation. Enhanced interoperability protocols and data sharing among process stakeholders improve operational efficiency and reduce errors.

Reducing CO₂ emissions throughout a building's life cycle remains a critical challenge for the construction sector. Promising strategies include reusing existing technological elements, particularly building envelopes, which can be preserved and enhanced through the addition of off-site prefabricated secondary envelopes to boost energy efficiency. This approach significantly lowers CO₂ emissions associated with construction by reducing material transportation, waste generation, and on-site rework. Such a model could drive the transition to sustainable construction, aligning with European climate goals while simultaneously

creating new economic opportunities for the sector.

Research methodology

The research methodology is structured into four main phases: analysis, model development, experimentation on a pilot case, and critical evaluation of the results.

1. **Analysis.** This phase operates on two levels. First, an analysis was conducted to examine key technologies, systems, and components aligned with the principles of *Offsite*, *Industrialised Building*, and *Modern Methods of Construction* (MMC). Second, a critical assessment of responsive bioclimatic technologies was undertaken, focusing on their suitability and adaptability for off-site applications. This assessment emphasised minimising material consumption and maximising the use of recycled ma-

- massimizzare l'autonomia energetica degli edifici rigenerati nella produzione e nella gestione dei flussi di risorse;
- ottimizzare le prestazioni NZEB e *Positive Energy* sia per i singoli edifici sia per interi comparti edilizi e urbano;
- ridurre i costi e i tempi di realizzazione, inserendo il processo all'interno di una logica circolare;
- definire soluzioni accessibili e replicabili che facilitino la creazione di nuove comunità energetiche.

Tali obiettivi, grazie all'adozione di una elevata prefabbricazione, possono essere raggiunti in tempi significativamente ridotti rispetto agli interventi di *retrofitting* tradizionali, minimizzando l'impatto sugli abitanti. Fin dalla fase progettuale si è tenuto conto delle logiche di disassemblaggio e fine vita di sistemi, componenti e materiali.

3. Sperimentazione su un caso pilota: con questa fase è stato implementato un caso pilota a Castelnuovo di Porto utilizzando strumenti per la verifica dell'efficienza energetica e della rapidità d'intervento. Tale intervento è stato progettato per valutare la possibile applicabilità di questi scenari nel contesto di riferimento con lo scopo di massimizzare i risultati energetici e strutturali e guardando all'intero ciclo di vita dell'edificio.
4. Sintesi e valutazione critica: questa fase finale, in corso di sviluppo, riguarda una sintesi dei risultati ottenuti e un confronto con le best practice internazionali con l'obiettivo di identificare i punti di forza e i limiti delle diverse strategie adottate. Gli sviluppi futuri della ricerca saranno orientati a perfezionare queste soluzioni e a individuare nuove opportunità per il miglioramento dei processi di retrofitting e decarbonizzazione.

materials, as specified by the Minimum Environmental Criteria (CAM). Exemplary energy retrofitting projects were analysed to evaluate the integration of bioclimatic design and renewable energy within advanced lightweight prefabrication processes. These projects were assessed based on their effectiveness in reducing energy consumption and promoting decarbonisation.

2. Model Development. Based on the analysis of the regulatory framework and ongoing experiments, a model was developed to address the specific climatic needs of Italy. This model aims to integrate the most effective solutions, adapted to the geographical and climatic conditions of the area. The methodological approach includes a detailed framework of the most promising technologies and practices for cli-

mate neutrality, along with a set of operational recommendations for designers. The analysis focused on both the three-dimensional system of the building envelope and individual components and materials, with the aim of:

- Maximising the energy autonomy of regenerated buildings, both in the production and management of energy flows and in water management;
 - Optimising NZEB and Positive Energy performance for both individual buildings and entire urban districts;
 - Reducing costs and construction times by embedding the process within a circular rationale;
 - Defining accessible and replicable solutions that facilitate the creation of new energy communities.
- By using a high degree of prefabrica-

Progetto pilota il quartiere “Le Terrazze”

Il quartiere “Le Terrazze”, situato a 10 km dal centro di Castelnuovo di Porto nella città metropolitana di Roma, è una interessante realizzazione nell'ambito dell'edilizia residenziale pubblica. Esso è costituito da edifici residenziali realizzati con tipologie edilizie a schiera e in linea (Fig. 1) e organizzati per specifici comparti edilizi (definiti settori nei documenti di concessione edilizia):

- Settore A, edificio in linea;
- Settore B, scuola materna;
- Settore C, residenziale:
 - C1, edificio a schiera con 11 unità abitative;
 - C2, C3, C4, C5, C6, C7: 22 edifici in linea per complessive 66 unità abitative;
 - C8, C9: 13 edifici in linea per complessive 52 unità abitative;
- Settore D, 3 edifici in linea per complessive 36 unità abitative;
- Settore E, 3 edifici in linea per complessive 36 unità abitative.

Il quartiere è caratterizzato da giardini e spazi pubblici, che favoriscono una certa vivibilità malgrado le diffuse condizioni di degrado del comparto edilizio (Fig. 2). In particolare, il verde pubblico occupa il 50% della superficie totale dell'area mentre il restante 50% del suolo risulta edificato (30%) e utilizzato per strade e sistemi di connessione (20%).

La sperimentazione progettuale, ispirata all'approccio “Energisprong”, ha riguardato in particolare l'edificio C1 che consta complessivamente di 11 unità abitative a schiera disposte ciascuna su due livelli. Preliminarmente è stata effettuata una ap-

tion, these goals can be achieved in significantly shorter timeframes compared to traditional retrofitting interventions, thus minimising the impact on residents. Disassembly and end-of-life considerations for systems, components, and materials were taken into account from the design stage.

3. Pilot Case Experimentation. A pilot case was implemented in Castelnuovo di Porto to test energy efficiency and rapid intervention tools. The intervention was designed to evaluate the applicability of these scenarios in the reference context, aiming to maximise structural and energy outcomes while considering the building's entire life cycle.

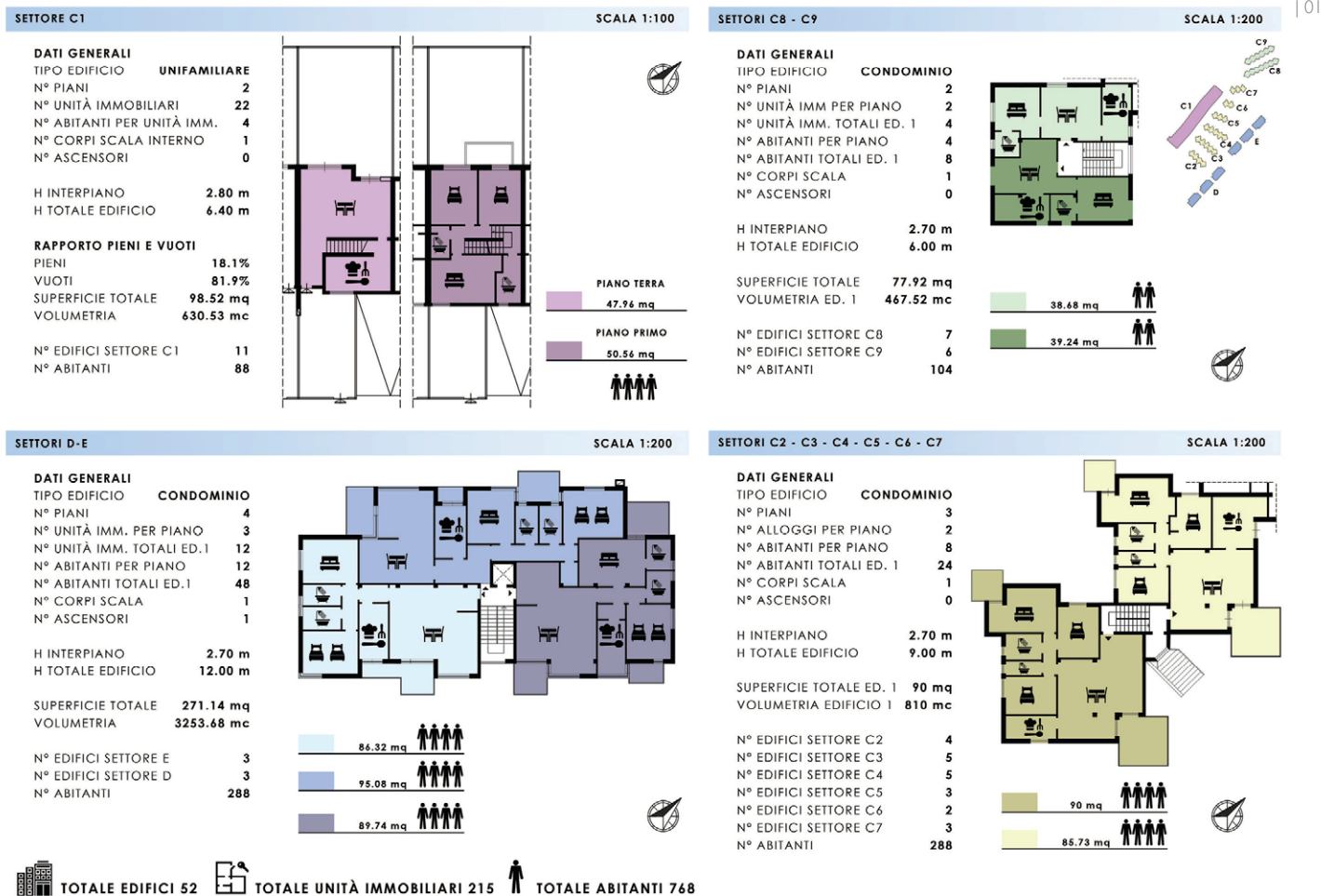
In this phase, a pilot case was implemented in Castelnuovo di Porto, using tools to verify energy efficiency and the speed of intervention. This project was designed to evaluate the

potential applicability of these scenarios in the Italian context, with the goal of maximising energy and structural outcomes, considering the building's entire life cycle.

4. Synthesis and Critical Evaluation: This final phase, currently under development, focuses on synthesising the results obtained, and on comparing them with international best practices, with the objective of identifying the strengths and weaknesses of the various strategies adopted. Future research developments will aim to refine these solutions and identify new opportunities for improving retrofitting and decarbonisation processes.

Pilot Project: The “Le Terrazze” district

The “Le Terrazze” district, located 10 km from the centre of Castelnuovo di



Porto within the Metropolitan City of Rome, is a notable example of public housing development. It comprises residential buildings organised into row houses and linear blocks (Fig. 1), structured into distinct building sectors (referred to as “compartments” in planning documents):

- Sector A: Linear building;
- Sector B: Kindergarten;
- Sector C: Residential, including:
 - C1: Row building with 11 housing units;
 - C2 to C7: 22 linear buildings totalling 66 housing units;
 - C8 and C9: 13 linear buildings totalling 52 housing units;
- Sector D: Three linear buildings totalling 36 housing units;
- Sector E: Three linear buildings totalling 36 housing units.

The district features gardens and public spaces, fostering a degree of live-

ability despite widespread degradation (Fig. 2). Public green areas cover 50% of the total surface, with 30% occupied by built structures and 20% allocated to roads and connective systems. The experimental project, inspired by the “Energiesprong” approach, focused on building C1, comprising 11 row housing units arranged over two levels. The initial phase involved a detailed analysis of the building context, identifying structural degradation issues and assessing energy-environmental performance levels (e.g., energy performance index, acoustic behaviour). An environmental analysis followed, highlighting critical conditions resulting from the interaction between microclimatic factors (sunlight, ventilation, humidity) and the building complex. The analyses revealed evident degradation and inadequate thermal perfor-

mance of the building envelope. For example, the thermal transmittance of vertical opaque structures ranged from 1.216 to 1.804 W/m²K, while the flat roof’s transmittance was 1.855 W/m²K, 5 to 7 times higher than the limits set by the Ministerial Decree of 26 June 2015 (0.32 W/m²K for renovated buildings in climate zone D; Appendix B, Table 1, and 0.26 W/m²K for roofs; Appendix B, Table 2). Windows also exhibited inadequate thermal transmittance, with values between 5.7 and 5.8 W/m²K compared to the regulatory limit of 1.8 W/m²K for climate zone D. According to a design strategy inspired by the “Energiesprong” approach, we then proceeded to design a “tailor-made” prefabricated component, specific for the building, consisting of envelope elements (panels; Fig. 3) characterised by dimensions, in height, equal to the overall height of

the building, and of variable width to adapt to the dimensional and articulation specificities of the façade. The panels were designed to be built in the factory, completely off-site. They were stiffened by an internal metal structure, including specific holes corresponding to the window frames, characterised by a stratigraphic composition (Fig. 4) such as to provide the energy-performance levels required by the regulations, with rock wool insulation, plasterboard panels and, for the exterior, reinforced concrete. The technical-realisation phase involves the assembly of panels overlapping the current envelope structure with an absolutely reduced timeframe, estimated at 8 days (estimate in Fig. 3; carried out considering the use of specialised and previously trained labour). They can be quickly assembled on-site by using self-propelled vehicles (cranes)

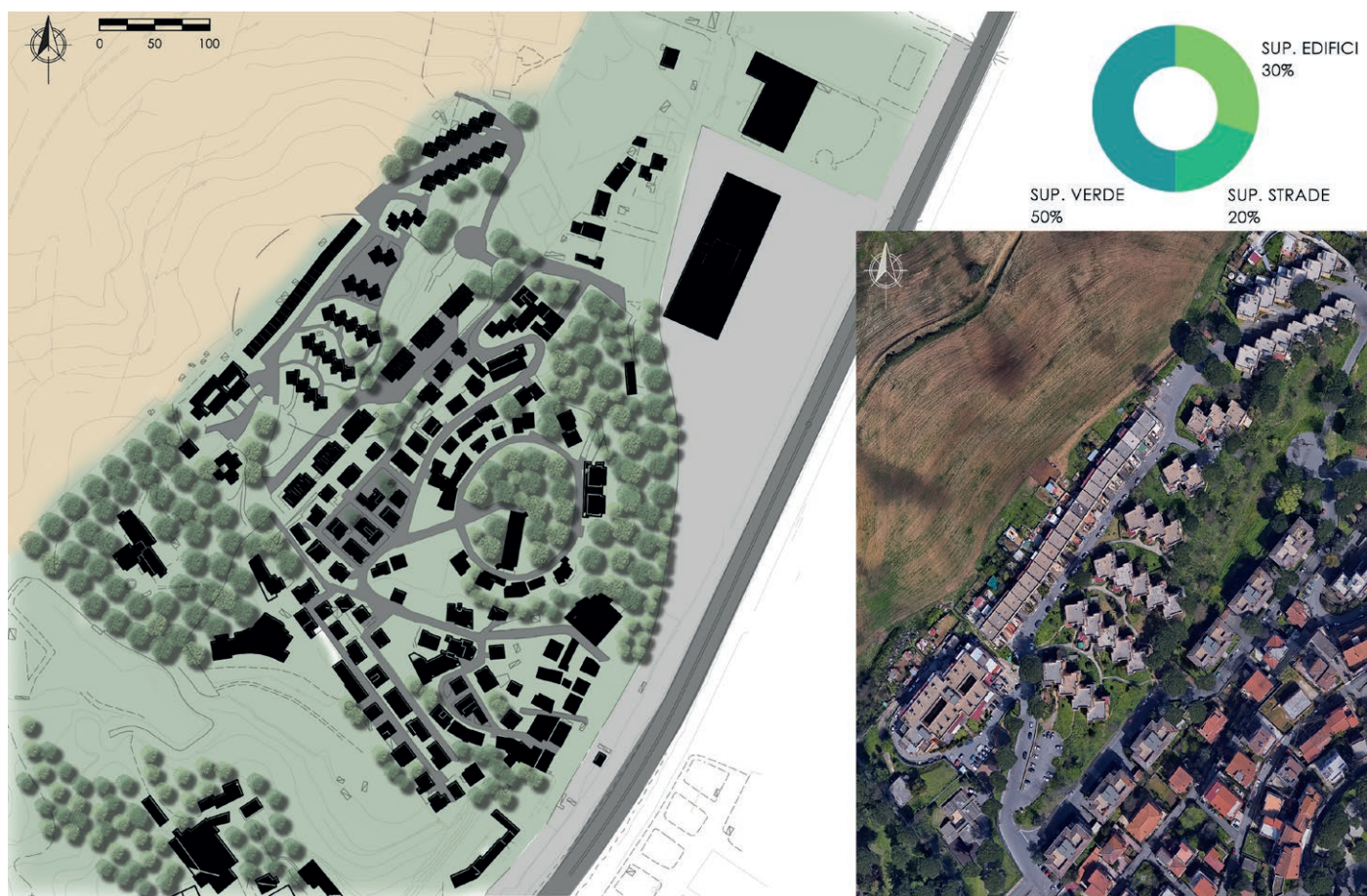
profondita fase di analisi del contesto edilizio, volta a porre in evidenza le condizioni di conservazione delle strutture edilizie, rilevando le problematiche di degrado nonché gli specifici livelli prestazionali di tipo energetico-ambientale (indice di prestazione energetica, comportamento acustico, ecc.). Successivamente è stata elaborata una specifica fase di analisi ambientale allo scopo di porre in evidenza le condizioni di criticità ambientale espresse dall'interazione tra le componenti microclimatiche (soleggiamento, ventilazione, umidità dell'aria) e il complesso edilizio.

Da tali analisi sono state evidenziate, in particolare, evidenti condizioni di degrado e di inadeguatezza prestazionale dell'involucro edilizio che, dal punto di vista del comportamento energetico, mostra livelli di trasmittanza delle strutture opache verticali variabili da 1,216 a 1,804 W/m^2K e pari a 1,855 W/m^2K per le strutture di copertura (solai piani), rispettivamente 5 volte e oltre 7 volte il valore limite fissato dal Decreto interministeriale del 26 giugno 2015. "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle

prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici" (0,32 W/m^2K per gli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica nella fascia climatica D; appendice B, tabella 1) e per le strutture di copertura (solai piani) (0,26 W/m^2K , appendice B, tabella 2). Anche tutti gli infissi sono caratterizzati da inadeguati livelli di trasmittanza termica, attestati su valori compresi tra 5,7 e 5,8 W/m^2K a fronte di limiti normativi pari a 1,8 W/m^2K per la fascia climatica D.

Secondo una strategia progettuale ispirata all'approccio "Energiesprong" si è proceduto quindi alla progettazione di una componentistica prefabbricata "su misura", specifica per l'edificio, consistente in elementi di involucro (pannelli; Fig. 3) caratterizzati da dimensioni, in altezza, pari all'altezza complessiva dell'edificio, e di larghezza variabile in adattamento alle specificità dimensionali e di articolazione del prospetto. I pannelli, irrigiditi da una struttura metallica interna e comprendenti specifiche bucatore in corrispondenza degli infissi, caratterizzati da una composizione stratigrafica (Fig. 4) tale da conferire i livelli energetico-prestazionali richiesti dalla nor-

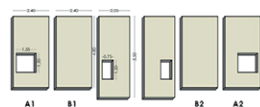
02 |



TEMPI DI POSA DEI PANNELLI SULLA STRUTTURA

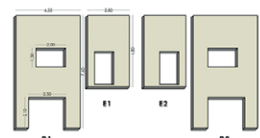


| 03



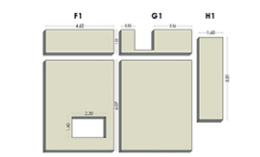
PROSPETTO	TIPO PANNELLO	mq	N° PANNELLI	TEMPO [min x 1 pannello]	TEMPO TOTALE DI REALIZZAZIONE	
A	A1	9,79	11	30	5h 30'	33h
	B1	11,54	11	30	5h 30'	
	C1	10,29	11	30	5h 30'	
	A1	9,79	11	30	5h 30'	
	B2	11,54	11	30	5h 30'	
	C2	10,29	11	30	5h 30'	

→ 5 giorni



B	D1	25,14	11	40	7h 20'	14h 40'
	E1	10,61	11	40	7h 20'	
	D2	25,14	11	30	5h 30'	
	E2	10,61	11	30	5h 30'	

→ 2 giorni



C	F1	7,11	1	20	20'	2h 20'
	G1	5,56	1	20	20'	
	H1	8,81	1	20	20'	
	I1	24,84	1	40	40'	
	J1	28,93	1	40	40'	



D	F2	7,11	1	20	20'	2h 20'
	G2	5,56	1	20	20'	
	H2	8,81	1	20	20'	
	I2	24,84	1	40	40'	
	J2	28,93	1	40	40'	

→ 1 giorno

TOTALE		285,21	120	600	63h 20'	
--------	--	--------	-----	-----	---------	--

Per giornata lavorativa di 8h = 7g 7h 20' → 8 giorni

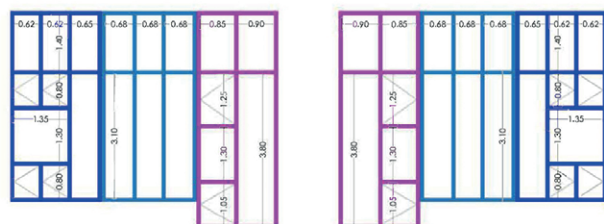


VELOCITA' LAVORI

SCHEMA DI POSIZIONAMENTO E DIMENSIONAMENTO DEI PANNELLI

SCALA 1:100

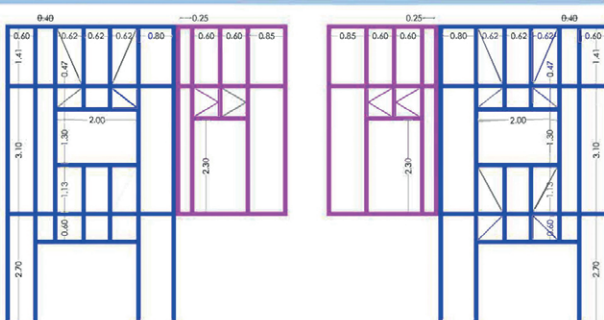
PORZIONE PROSPETTO A



PROSPETTO C

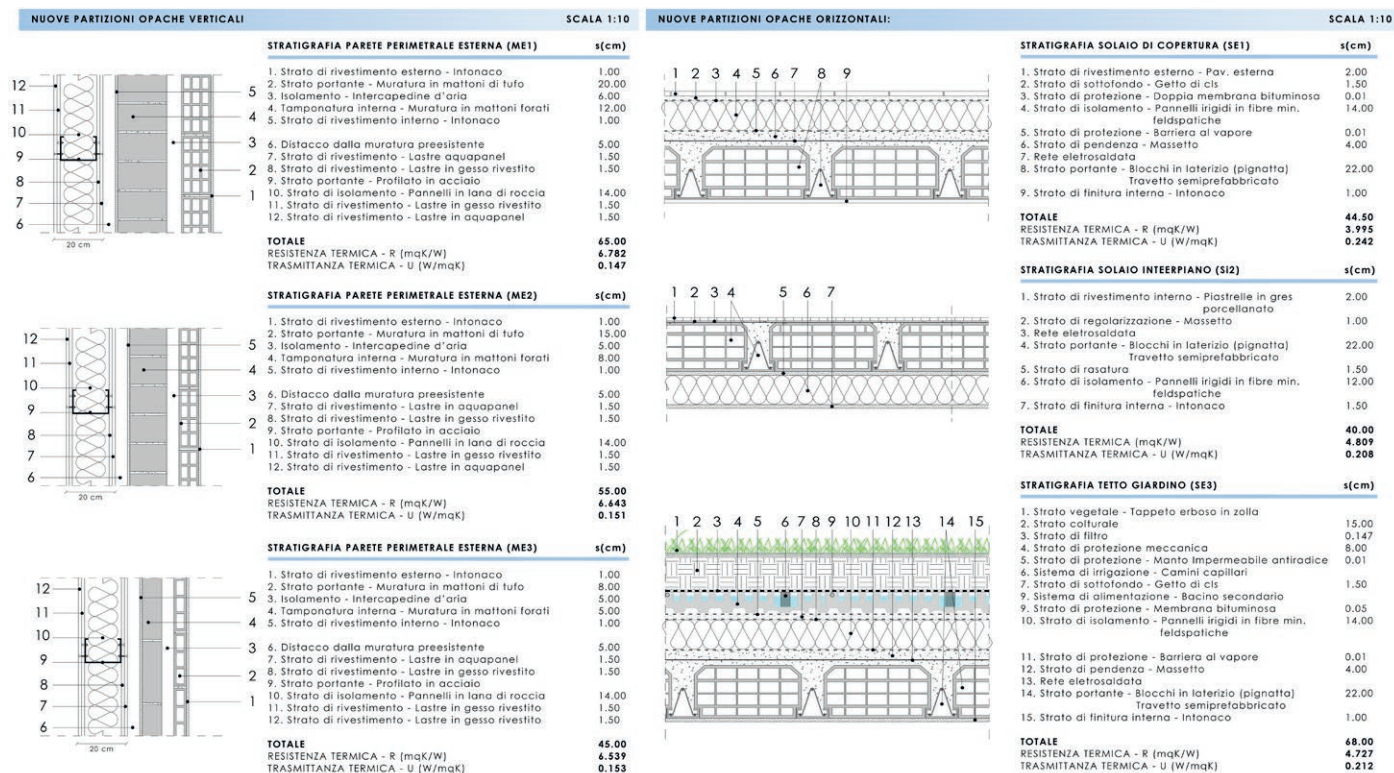


PORZIONE PROSPETTO B



PROSPETTO D





mativa, con isolamento in lana di roccia, lastre in cartongesso e, per l'esterno, in cemento rinforzato, sono stati pensati per una realizzazione in stabilimento, completamente *off-site*. La fase tecnico-realizzativa prevede il montaggio dei pannelli in sovrapposizione all'attuale struttura di involucro: con una tempistica assolutamente ridotta, stimata in 8 giorni (stima in Fig. 3; effettuata considerando l'impiego di manodopera specializzata e precedentemente istruita) possono essere velocemente montati in opera con l'utilizzazione di mezzi (gru) semoventi

on wheels, equipped with mechanical arms, creating a new building envelope without requiring the removal of the people who live in the building. Considering all the planned building operations (construction of the new covering with green roof, dismantling and assembly of the new fixtures, etc.), the estimated construction times fall within a month. In fact, part of the technical-installation process of the technological retrofitting operation has been moved to the factory, significantly saving time on site, together with an economy of on-site labour costs also in relation to the overall costs of the construction process. A total of 120 prefabricated panels were installed, designed in standardised types. The thermal transmittance was reduced to 0.15 W/m²K, achieving a 90% improvement in energy efficiency. The double-skin façade is

secured to the existing structure with high strength steel supports, ensuring stability, durability, and acoustic insulation (Fig. 5, Fig. 6). Non-aligned surfaces were treated with external thermal insulation, and window replacements achieved a transmittance of 1.6 W/m²K. The intervention also included a green roof with shared gardens accessible via prefabricated external staircases, promoting social interaction among residents (Fig. 7). Renewable energy systems, such as photovoltaic panels and solar collectors, were installed to transform the building into an NZEB. An energy performance analysis revealed a shift from the pre-intervention class (201.68 kWh/m² per year) to energy class A4, with an energy performance index of 54.42 kWh/m² per year, reducing CO₂ emissions by 79%, from 64.8 kgCO₂/m² per year to 13.2 kgCO₂/m² per year.

con bracci meccanici su ruote, realizzando un nuovo involucro edilizio senza comportare l'allontanamento delle persone che abitano l'edificio.

Considerando la totalità delle operazioni edilizie previste (realizzazione della nuova copertura con *green roof*, smontaggio e montaggio dei nuovi infissi, ecc.) i tempi di realizzazione stimati rientrano in un mese. Di fatto parte del processo tecnico-realizzativo dell'operazione di retrofitting tecnologico è stato spostato in stabilimento, realizzando una notevolissima econo-

Conclusions

The rehabilitation of the building stock is pivotal in addressing the climate crisis and improving urban living quality. The innovative technological retrofitting approach, inspired by the "Energiesprong" model, offers a practical pathway toward concrete sustainability objectives. The pilot project in the "Le Terrazze" district demonstrated that tangible results in energy efficiency and housing comfort can be achieved through advanced deep retrofit solutions based on unconventional manufacturing processes characterised by the use of prefabrication, the contraction of manufacturing times, and the reduction of on-site work. Although the focus has been mainly on operational emissions during the use of buildings, it is clear that a complete analysis cannot ignore the systematic inclusion of all emissions related to the

entire life cycle of the building. The integration of such calculations into the evaluation framework of the energy and environmental performance of buildings is still an open topic that opens to further research developments.

Future applications and studies on a larger scale could further strengthen the replicability and effectiveness of such interventions in different building contexts. In summary, the proposed deep retrofit strategy could be one of the key answers to the challenge of converting existing buildings into eco-efficient and low environmental impact constructions, with a view to reducing climate-altering emissions, while also improving their economic value and living comfort conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper illustrates the results of

mia dei tempi in cantiere, unitamente a una economia dei costi di manodopera in situ anche in relazione ai costi complessivi del processo realizzativo.

L'intervento comprende complessivamente l'installazione di 120 pannelli prefabbricati, progettati in tipologie standardizzate. La trasmittanza termica passerà dai livelli citati a $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, con un'efficienza energetica migliorata nell'ordine del 90%. La doppia pelle esterna sarà connessa alla struttura esistente con carpenteria metallica e supporti in acciaio ad alta resistenza, garantendo altresì stabilità, durabilità e isolamento acustico (Figg. 5, 6).

Nelle aree non adatte all'installazione dei pannelli prefabbricati (superfici non complanari, rientranze, ecc.) sarà utilizzato un cappotto termico esterno. La sostituzione degli infissi porterà la trasmittanza delle chiusure trasparenti a valori di $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Per la copertura è previsto un *green roof* e la realizzazione di orti condivisi, accessibili tramite scale esterne prefabbricate per promuovere la socialità tra i residenti (Fig. 7).

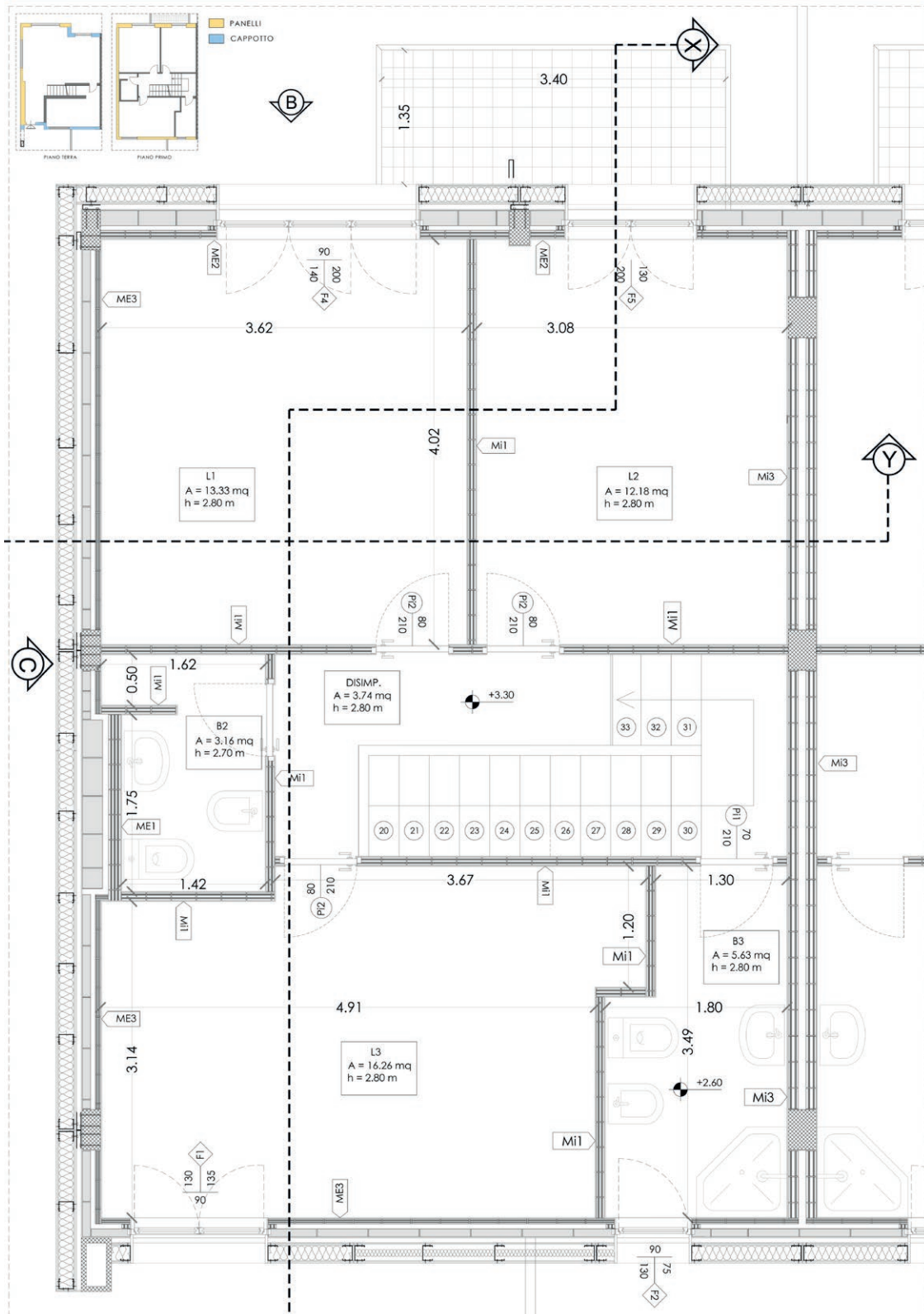
L'intervento è completato con l'installazione di sistemi di produzione energetica da fonte rinnovabile, pannelli fotovoltaici e collettori solari, che consentono di trasformare gli edifici in NZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*). L'analisi delle prestazioni energetiche, condotta secondo la metodologia di calcolo dell'attestato di prestazione energetica (APE), evidenzia il raggiungimento della classe energetica A4, con un indice di prestazione energetica pari a $54,42 \text{ Kwh/mq}$ annuo rispetto ad una base di partenza ante operam di $201,68 \text{ Kwh/mq}$ annuo, contribuendo così alla riduzione del 79% di emissioni di CO_2 che passano da $64,8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ a $13,2 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2\text{a}$.

Conclusioni

La riqualificazione del patrimonio edilizio è cruciale per affrontare la crisi climatica e migliorare la qualità della vita urbana. L'approccio innovativo di retrofitting tecnologico, basato su strategie integrate e su tipologie di intervento ispirati al modello "Energiesprong", offre un percorso praticabile verso concreti obiettivi di sostenibilità. Il progetto pilota nel quartiere "Le Terrazze" ha dimostrato che è possibile ottenere risultati tangibili in termini di efficienza energetica e benessere abitativo attraverso l'adozione di soluzioni avanzate di deep retrofit basate su processi realizzativi non convenzionali caratterizzati dall'uso della prefabbricazione, dalla contrazione delle tempistiche di realizzazione e dalla riduzione delle lavorazioni in cantiere. Sebbene l'attenzione sia stata principalmente focalizzata sulle emissioni operative durante l'uso degli edifici è evidente che un'analisi completa non possa prescindere dall'inclusione in maniera sistematica di tutte le emissioni relative all'intero ciclo di vita dell'edificio. L'integrazione di tali calcoli nel quadro valutativo delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici è ancora una tematica aperta che apre ad ulteriori sviluppi della ricerca.

Future applicazioni e studi su scala più ampia potrebbero rafforzare ulteriormente la replicabilità e l'efficacia di tali interventi in contesti edilizi diversi. In sintesi, la strategia di deep retrofit proposta, potrebbe configurarsi come una delle risposte-chiave alla sfida della riconversione degli edifici esistenti in organismi edilizi eco-efficienti e a basso impatto ambientale, nell'ottica della riduzione delle emissioni climalteranti, migliorando altresì il valore economico degli stessi e le condizioni di comfort abitativo.

a specific research on the topic of technological retrofitting and deep retrofit, scientific director Domenico D'Olimpio, Team: Valeria Cecafofso and Gaia Turchetti with Valeria Brambilla and Eng. Marco Cucuzza (out-of-town operations consultant Edera s.r.l.); of research "FASTECH – A model for rapid technological building retrofit to cut energy demand and GHG emissions of housing toward renewable energy self-consumption and the smart energy communities", Rs.F. Tucci, Team V. Cecafofso and G. Turchetti; of research: "PNRR Rome Technopole Spoke 3 and Spoke 5 FP2, Theme Line 1 and Subtopic 1.2; PI Prof. F. Tucci, Co-ordinators under the table 1.2 D'Olimpio, Cecafofso, Team: M. Giampaolletti, G. Turchetti; with K. Mitrik, L. Montagner. Image processing: Arch. Valeria Brambilla.



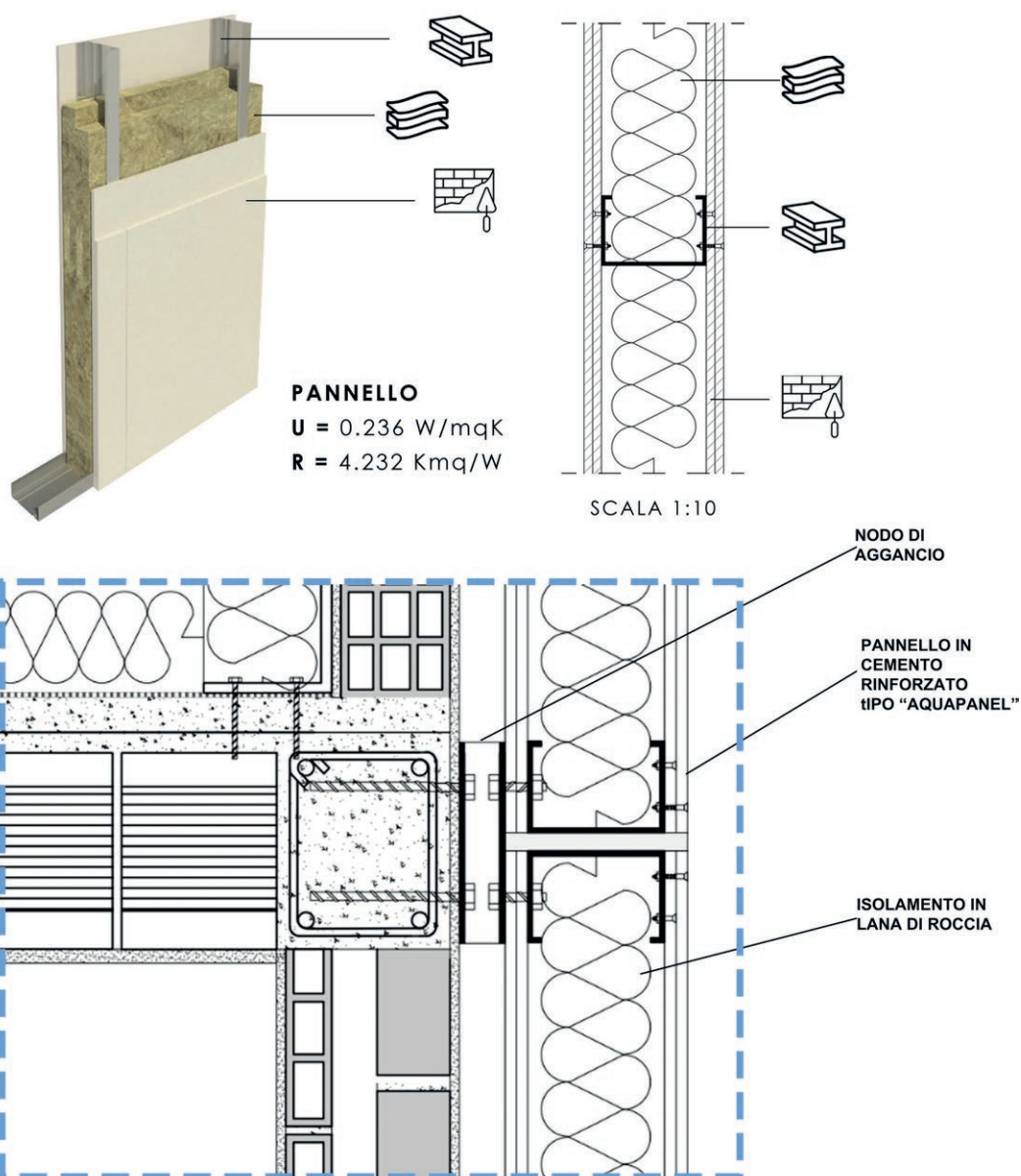
ATTRIBUZIONE E RICONOSCIMENTI

Il paper illustra gli esiti di una specifica ricerca sulla tematica del retrofitting tecnologico e del deep retrofit, responsabile scientifico Domenico D'Olimpio, Team: Valeria Cecafofso e Gaia Turchetti con Valeria Brambilla e ing. Marco Cucuzza (consulente operativo fuorisede Edera s.r.l.); della ricerca "FASTECH - A model for rapid technological building retrofit to cut energy demand and GHG emissions of housing toward renewable energy

self-consumption and the smart energy communities", Rs.F. Tucci, Team V. Cecafofso e G. Turchetti; della ricerca: "PNRR Rome Technopole Spoke 3 e Spoke 5 FP2, Theme Line 1 and Subtopic 1.2; PI Prof. F. Tucci, Co-ordinatori sotto tavolo 1.2 D'Olimpio, Cecafofso, Team: M. Giampaolletti, G. Turchetti; con K. Mitrik, L. Montagner. Elaborazione delle immagini: Arch. Valeria Brambilla.

I PANNELLI

| 06



REFERENCES

Building 4.0 CRC (2024), *Quick-Fact-Sheet*. Available at: <https://building4pointzero.org/wp-content/uploads/2022/12/Building-4.0-CRC-Quick-Fact-Sheet-Dec-2022.pdf> (Accessed on 03/02/2025).

Causone, F., Tatti, A., & Alongi, A. (2021). "From Nearly Zero Energy to Carbon-Neutral: Case Study of a Hospitality Building". *Applied Sciences*, Vol. 11 n. 21, 10148. Available at: <https://doi.org/10.3390/app112110148>.

D'Olimpio D. (2023), *Il Retrofitting Tecnologico. Energetico e Bioclimatico nell'Edilizia*, Legislazione Tecnica, Roma.

Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 8 maggio 2024. Available at https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401275 (Accessed on 03/02/2025).

Guo, Y., Shi, E., Yan, R. *et al.* (2023), "System based greenhouse emission analysis of off-site prefabrication: a comparative study of residential projects", *Sci Rep.*, Vol. 13, p. 10689. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37782-x>.

Satola, D., Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Wiberg, A.H., Gustavsen, A. (2021). How to define (net) zero greenhouse gas emissions buildings: The results of an international survey as part of IEA EBC annex 72. *Build. Environ.* Vol. 192. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107619>.

Lützkendorf, T., Frischknecht, R. (2020), (Net-) zero-emission buildings: A typology of terms and definitions. *Build. Cities* Vol 1, pp. 662-675. Available at: <https://doi.org/10.5334/bc.66>.

Ruoyu J., Jingke Hong b, Jian Zuoc, (2020), "Environmental performance of off-site constructed facilities: A critical review." *Energy and Buildings* Vol. 207. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109567>.

Tucci F (2018), *Costruire e Abitare Green. Approcci, Strategie, Sperimentazioni per una Progettazione Tecnologica Ambientale | Green Building and Dwelling. Approaches, Strategies, Experimentation for an Environmental Technological Design*, Altralinea Edizioni, Firenze.

Zhivov A., Rudiger L. (2020), *Deep Energy Retrofit – A Guide to Achieving Significant Energy Use Reduction With Major Renovation Projects*, Springer, Berlino.

07 |

CANTIERIZZAZIONE

