

LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO ATTRAVERSO UN SISTEMA ISOLANTE COMPOSITO. MESSA IN OPERA E MISURA DELLE PRESTAZIONI

THE BUILDING ENVELOPE RENOVATION THROUGH COMPOSITE INSULATION SYSTEM. INSTALLATION AND MEASUREMENT OF PERFORMANCE

di Graziano Salvalai*, Emilio Pizzi*, Giuliana Iannaccone*, Marta Maria Sesana*

*Politecnico di Milano - Milano, Italia.

graziano.salvalai@polimi.it

emilio.pizzi@polimi.it

giuliana.iannaccone@polimi.it

marta.sesana@polimi.it

Abstract

Più del 60% del patrimonio edilizio esistente in Lombardia è stato costruito prima degli anni '70 ed è tra i principali responsabili dell'assorbimento di energia finale e delle corrispondenti emissioni di CO₂. Di questo, gli edifici residenziali costituiscono la parte preponderante, con un indice di prestazione globale medio pari a 201,8 kWh/m²a. La promozione di interventi su tali edifici, anche attraverso la diffusione di soluzioni innovative, assume una crescente importanza sia per contenere le emissioni climalteranti che per sostenere la crescita del settore edile. A tale riguardo, il seguente lavoro presenta la riqualificazione energetica di un edificio di housing sociale in provincia di Milano mediante l'applicazione di pannelli prefabbricati innovativi che integrano sia funzioni d'isolamento termico che di finitura esterna. Nello specifico sono descritti, da una parte, il processo di analisi e le scelte progettuali adottate e, dall'altra, le modalità di messa in opera del sistema; inoltre sono presentate le prestazioni in opera dell'involucro riqualificato attraverso i dati rilevati durante la campagna di monitoraggio.

1. Introduzione

L'energia finale assorbita dal settore residenziale per riscaldare gli ambienti e per produrre l'acqua calda per gli usi sanitari rappresenta circa il 30% dei consumi energetici nazionali ed è causa di circa il 25% delle emissioni totali di anidride carbonica, una delle cause principali dell'effetto serra e del conseguente innalzamento della temperatura del globo terrestre. Al 2013, gli edifici a destinazione d'uso residenziale risultano pari a 11,7 milioni¹, di questi circa il 49% sono localizzati in zona climatica E ed F caratterizzate, come noto, da climi prevalentemente invernali. Oltre il 60% di tale parco edilizio ha più di 45 anni, e risulta perciò antecedente al 1976, anno in cui è stata emanata la prima legge sul risparmio energetico in edilizia², ed oltre il 25% registra consumi annuali compresi tra 160 kWh/m²anno ed oltre 200 kWh/m²anno. La principale fonte energetica utilizzata è rappresentata dal gas naturale con il 46% del totale, seguita dalla biomassa legnosa con il 22% e dall'energia elettrica 19,2%. I dati

Abstract

More than 60% of the existing building stock in Lombardy Region has been built before the 70's and it is among the main responsible causes of final energy absorption and corresponding CO₂ emissions. In this view, the residential buildings represent the main relevant part with a mean overall performance index of 201.8 kWh/m²a. The promotion of renovation measures for such buildings, also through innovative solutions, is becoming increasingly important for both containing the greenhouse gas emissions and supporting the growth of the construction sector. To this topic, the work presents the energy renovation of a social housing building in the Province of Milan through the application of innovative prefabricated façade panels that integrate both thermal insulation and exterior finishing. In detail, the paper describes, on one hand, the relevant design strategies following the preliminary analysis and, on the other hand, the process of installation; besides, the final performance of the retrofitted envelope is documented by the results of the monitoring campaign.

1. Introduction

The final energy consumption of the residential sector for space heating and domestic hot water represents about 30% of national energy consumption and about 25% of the total emissions of carbon dioxide, one of the main causes of the greenhouse effect and the related increase of the global temperature level. In 2013, the residential buildings were about 11.7 million, and about 49% of the total is located in the climate zones E and F that are mainly characterized by winter climates. Over 60% of the existing building stock has more than 45 years; most of it has been built before 1976 – when the first national law regarding energy saving in buildings² has been introduced - and more than 25% has an annual consumption between 160 and 200 kWh/m²year. The main energy source is represented by natural gas with 46% of the total, followed by biomass (wood) with 22%, and 19.2% from electricity. In addition, data collected within the Regional Energy Registry of the Lombardy (CEER)³ confirm highlight an average primary energy demand for the heating season of Lombardy buildings

raccolti all'interno del catasto energetico regionale della Lombardia (CEER)³ supportano quanto riportato, evidenziando un fabbisogno di energia primaria medio degli edifici lombardi per la climatizzazione invernale pari a 201 kWh/m²anno, con emissioni pari a 43,75 kgCO₂eq/m²anno. Sempre da dati regionali, la trasmittanza media delle strutture d'involucro risulta pari a 1,09 W/m²K, circa quattro volte superiore al valore limite delle strutture opache verticali previste per legge a decorrere dal 2021⁴. Come noto, una delle strategie più promettenti in termini di rapporto costi/benefici riguarda l'intervento sull'involucro. In tale scenario il progetto EASEE (Envelope Approach to improve Sustainability and Energy efficiency in Existing multi-storey multi-owner residential buildings), finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del Settimo programma quadro di Ricerca e Sviluppo, ha tra gli obiettivi lo sviluppo di sistemi innovativi per la riduzione del fabbisogno di energia in edifici residenziali multipiano e multiproprietà. A partire da tali premesse, il paper descrive i risultati delle attività dimostrative di progetto, che riguardano la riqualificazione energetica dell'involucro di un edificio residenziale mediante l'applicazione di un sistema prefabbricato modulare composto da un'anima di EPS compresa tra due strati sottili di calcestruzzo fibrorinforzato ed ancorato mediante fissaggi meccanici puntuali alla struttura esistente.

2. Descrizione dell'edificio dimostrativo

Una delle principali attività della ricerca ha riguardato la dimostrazione su un caso reale dell'efficacia della tecnologia innovativa sviluppata. A tale scopo, con il supporto di Regione Lombardia, è stato individuato un edificio residenziale multipiano edificato nel 1971, con caratteristiche tecnologiche rappresentative dell'epoca. L'immobile di proprietà ALER (Azienda Lombarda Edilizia Residenziale) si sviluppa su quattro livelli, di cui quello al piano terra adibito a box e spazi accessori. Lo sviluppo lordo della superficie di piano è di circa 281 m² con un'altezza interna media di 3 m; la superficie di sviluppo dei prospetti è di circa 900 m² (Fig.1). Dal punto di vista tecnologico l'involucro si caratterizza per la presenza di una doppia pelle con uno strato esterno costituito da 20 cm di calcestruzzo armato gettato in opera, un'intercapedine di 5,5 cm di cui circa 3 riempiti con polistirolo espanso, ed una fodera interna in laterizio forato dello spessore di 8 cm con 10 mm di intonaco. L'involucro trasparente è costituito da elementi

equal to 201 kWh/m² per year, with emissions of 43.75 kgCO₂eq/m²year. Other regional data confirm that the mean thermal transmittance of the building envelope is equal to 1.09 W/m²K, about four times the threshold set by the standard at 2021⁴. As it is well known, the upgrading of the building envelope is one of the most promising strategies in terms of cost / benefit ratio. In this scenario, the project EASEE (Envelope Approach to improve Sustainability and Energy efficiency in Existing multi-storey residential buildings multi-owner), funded by the European Union under the Seventh Framework Programme for Research and Development, among its main objectives had the development of innovative systems for the reduction of energy use in residential multifamily buildings. In particular, this paper describes the results of the demonstration activities developed within the project which refer to the implementation of an overall envelope retrofitting of a residential building with a modular prefabricated façade system composed by a core of EPS and two layers of textile reinforced concrete and applied to the existing structure by means of mechanical anchoring. The description covers all the process, from the project development to the site management and the monitoring campaign.

2. The case study building

One of the main tasks of the research project was the demonstration of the developed technological innovations on a real case. For this reason, a typical multi-storey residential building built in the 1971 has been selected - with the support of the Lombardy Region - as a demonstration building. The building, owned by ALER (Azienda Lombarda Edilizia Residenziale) has four storeys with the ground floor used for parking and storage spaces. The gross floor area for each floor is about 281 square meters with an internal height of 3,0 meters; the total area of the building envelope is about 900 square meters (Fig.1). From the technological point of view, the envelope is characterized by a cavity wall with an outer steel reinforced concrete layer of 20.0 cm, 2 cm of air gap, 3,0 cm of polystyrene and an inner hollow brick layer of 8 cm with additional 10 mm of cementitious plaster. The windows are characterized by an iron frame and a single glass with a thermal transmittance of 6,0 W/m²K. From the qualitative point of view, the radiometric image of Fig. 2 shows the location of the main critical points on the envelope: the position of the load-bearing structural elements and the radiators in the sub-window areas are clearly visible.

monoblocco con telaio in ferro e vetro singolo la cui trasmittanza termica è stimata in $6,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dal punto di vista qualitativo, l'immagine radiometrica di Fig. 2 evidenzia la localizzazione dei principali punti critici dell'involucro: si nota chiaramente la posizione della struttura portante e dei radiatori nelle zone sottofinestra. Sempre dalla Fig. 2 è possibile osservare la disomogeneità puntuale della temperatura superficiale con valori che oscillano tra gli $8\text{-}9^\circ\text{C}$ nella porzione di muratura di tamponamento e tra $14\text{-}15^\circ$ nella zona sottofinestra. A supporto dei dati tabellari, la qualità dell'involucro è stata stimata sia attraverso programmi di modellazione agli elementi finiti che attraverso indagini di misura sperimentali condotte con sonde termoflussimetriche e di temperatura superficiale. I risultati delle prove hanno evidenziato dati concordanti in linea con il valore misurato, tipico della tecnologia, e pari a $0,89 \text{ W/m}^2\text{k}$. Dal punto di vista impiantistico l'edificio è allacciato ad una rete di teleriscaldamento in grado di soddisfare i fabbisogni di calore e di acqua calda sanitaria. L'analisi dei consumi storici (media delle stagioni termiche comprese tra il 2009 ed il 2014) evidenzia un fabbisogno di energia finale medio pari a 196 kWh/m^2 anno, in linea con la media lombarda per gli edifici della stessa destinazione d'uso. Da un'analisi di dettaglio, considerata la geometria dell'edificio e la tipologia di costruzione, si è potuto stimare che circa il 60% delle dispersioni avviene in corrispondenza dell'involucro verticale opaco, mentre il 30% è dovuto ai componenti trasparenti ed il 10% alla presenza di ponti termici.

3. Metodologia dell'intervento di riqualificazione

Come anticipato nell'introduzione, per affrontare la questione del recupero efficiente dell'involucro edilizio di edifici esistenti, il progetto EASEE ha perseguito la realizzazione di un processo progettuale integrato, che unisce strategie di analisi e rilievo evolute con tecnologie innovative di intervento, con l'obiettivo di ridurre l'energia finale richiesta per il riscaldamento. In questa sezione vengono illustrate e spiegate le fasi metodologiche seguite a partire dal rilievo dell'esistente, passando per la progettazione tecnologica dell'intervento di recupero di facciata, fino alla sua realizzazione (Fig. 3).

3.1 Rilievo geometrico e tecnologico dell'esistente

La prima e fondamentale fase della metodologia di

From Fig. 2 it is also possible to observe the punctual inhomogeneity of the surface temperature with values that fluctuate between $8\text{-}9^\circ\text{C}$ on the infill portion and between $14\text{-}15^\circ$ on the window sill. In order to support the tabular data, the quality of the envelope has been estimated through both finite element analysis and experimental measurement surveys by thermo couple and surface temperature probes. The results have shown consistent data in line with the measured values, typical of the building technology, and equal to $0,89 \text{ W / m}^2\text{K}$. About the building services, the building is connected to a heating district plant able to cover the overall requirements of heat and hot water. The analysis of historical consumptions (average thermal seasons between 2009 and 2014) shows an average final energy requirement of 196 kWh/m^2 per year, in line with the Lombardy average for buildings of the same use. Given the building geometry and the construction typology, it has been estimated that about 60% of the energy losses are due to the opaque envelope, while 30% is due to the transparent components and 10% to the thermal bridges.

3. Methodology of the building refurbishment

As mentioned in the introduction, to address the issue of energy efficiency retrofitting facades of existing buildings, the EASEE project aims to be an integrated design process, combining advanced analysis of the building stock with the development of innovative strategies, for the final goal of reducing the energy required by the building occupants. This section describes and explains the methodological steps followed from the audit survey, to the technological design of the façade retrofitting, through the construction site (Fig. 3).

3.1 Geometrical and technological survey

The first and crucial step of the methodology regarded the implementation of a geometric survey on the existing building in order to build a BIM model reproducing the real geometric irregularities of the structure and to make a correct design of the new envelope panels. The survey was executed through the use of the three-dimensional scanner Focus 3D characterized by a high scanning speed and a resolution up to 70-megapixel colors (Fig. 4). Once collected all the points, through the use of a CAD software, the two-dimensional drawings have been derived relating to plans, elevations and all the main sections, both vertical and horizontal. Subsequently, through the Revit software, a three-dimensional geo-referenced model was built and used as a base for the

intervento è stata la realizzazione del rilievo geometrico dell'esistente con l'obiettivo di creare un modello BIM, che riproducesse il più fedelmente possibile le irregolarità geometriche della struttura e da usare come base per la corretta e precisa progettazione dell'intervento di riqualificazione dell'involucro. Il rilievo è stato eseguito attraverso l'uso dello scanner tridimensionale Focus 3D caratterizzato da un'elevata velocità di scansione e da una risoluzione fino a 70 megapixel a colori (Fig. 4). Una volta raccolti tutti i punti, tramite l'utilizzo di un software CAD, sono state derivate le tavole bidimensionali relative a piante, prospetti e a tutte le sezioni sia verticali che orizzontali necessarie. Successivamente, tramite il software Revit, è stato creato un modello tridimensionale geo-referenziato usato come base per la progettazione del nuovo involucro modulare, al fine di ottimizzare numero e dimensione degli elementi di facciata ed infine per definire la posizione esatta degli ancoraggi. Unitamente al rilievo laser, è stata condotta una campagna termografica che ha permesso di eseguire indagini non distruttive sull'edificio, visualizzando in tempo reale la mappa del calore e misurando la temperatura superficiale di facciata senza contatto. Le indagini hanno messo in luce i punti critici dell'edificio: non solo la presenza di ponti termici strutturali, ma anche di ponti termici localizzati nelle aperture trasparenti (nodo infisso/parete).

3.2 Progetto della soluzione tecnologica di facciata

La fase riguardante la progettazione dell'intervento ha portato allo sviluppo di una soluzione innovativa per la riqualificazione dell'involucro tramite l'impiego di pannelli prefabbricati con prestazioni elevate sia dal punto di vista strutturale che energetico. La soluzione scelta, tra le diverse opzioni studiate, si compone di un'anima in EPS dello spessore di 100 mm accoppiato a due strati esterni di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre polimeriche (Textile Reinforced Concrete TRC) dello spessore di 12,5 mm. Il sistema così composto si caratterizza per un'ottima resistenza a compressione e un'alta resistenza a trazione. La produzione del pannello è avvenuta mediante getto in pressione del calcestruzzo in verticale in uno specifico cassero con sponde a posizione variabile. Attraverso l'uso di pigmenti mescolati nel getto di TRC è stato possibile ottenere diverse colorazioni. Inoltre, applicando in fase di getto apposite matrici siliconiche, è stato possibile imprimere sulle facce a vista dei pannelli diversi rilievi e forme.

modeling of the new modular envelope so as to optimize the number and size of the prefabricated façade elements and, finally, to fix the exact position of the anchors. Together with the laser survey, a thermographic campaign was conducted, allowing to perform a non-destructive investigations on the building, viewing in real time the heat map on the elevation and measuring the facade surface temperature without contact. The surveys have revealed the critical points of the building: not only the presence of structural thermal bridges, but also of thermal bridges located in the joints between the windows and the opaque envelope (frame/wall junction)

3.2 Technological detail of the building façade

The phase concerning the recovery of the intervention design has led to the development of an energy retrofit solution with high performance prefabricated panels from different point of view: structural and energetic. The chosen solution, between different options studied, consists of a core of EPS, 100 mm thickness laminated to two outer layers of concrete, fiber-reinforced with polymer fibers (Textile Reinforced Concrete TRC) of thickness equal to 125 mm. Excellent resistance to compression and a high tensile strength characterizes the system. The production of the panel is occurred, unlike the normal practice of prefabrication, through the casting of the concrete in the vertical in a modular formwork with variable position shores, specially designed within the project. Using mixed pigments in the TRM casting, it has been possible to obtain different coloration. Furthermore, by applying during the casting a special silicone matrices, it has been possible to imprint on the exposed faces of the different panel shapes and reliefs. For the demonstration building three different colors were produced: white, natural and anthracite and a test matrix was conducted with reliefs of 50 mm vertical stripes. The overall design of the facades has been optimized by evaluating at the same time the composition quality, the size and number of panels to be produced. The final design configuration consists of a total of 186 panels divided into 28 different types of size, color and texture finish. During the design of the panel, it was also essential the study of the critical points of the façade: in particular the definition of the joints between the panels (Fig. 5) and the windows and/or balconies interfaces. This activity has highlighted the following requirements to be fulfilled: be possible to replace damaged panels or other façade components; ensure the air tightness of the casing in connection with the existing

Per l'edificio dimostrativo sono state prodotte tre diverse colorazioni, bianco, naturale e antracite ed è stata utilizzata come test una matrice con rilievi da 50 mm a righe verticali. Il disegno complessivo delle facciate è stato ottimizzato valutando contemporaneamente la qualità compositiva, le dimensioni ed il numero di pannelli da produrre. La configurazione del progetto esecutivo è composta in totale da 186 pannelli suddivisi in 28 tipologie diverse per dimensione, colore e texture di finitura. Durante la progettazione del pannello è stato fondamentale, inoltre, lo studio dei punti critici di facciata: in particolar modo la definizione dei giunti tra i pannelli (Fig. 5) e le interfacce con finestre e balconi. Quest'attività ha messo in luce i seguenti requisiti da soddisfare: prevedere la possibilità di sostituire i pannelli danneggiati o altri elementi di facciata; garantire la tenuta all'aria dell'involucro in connessione con la facciata esistente e, inoltre, garantire le tolleranze necessarie per l'assemblaggio e il movimento correlato dei vari elementi che costituiscono la facciata. La criticità dei giunti è stata risolta combinando due prodotti: un cordone di tamponamento in polietilene accoppiato ad un sigillante siliconico acrilico a basso modulo elastico. Il cordone di tamponamento (del diametro pari a 20 mm), non assorbente nè degradabile, ha permesso il riempimento del giunto prima dell'applicazione del sigillante. L'accoppiamento tra i due materiali ha permesso la perfetta tenuta dei giunti di dilatazione e il raccordo tra i pannelli; tale soluzione ha permesso inoltre di compensare eventuali movimenti evitando fessurazioni e distacchi. Nello specifico, è stato impiegato un sigillante siliconico a reticolazione neutra e bassissimo modulo elastico, con ottimi valori di resistenza all'invecchiamento, con una range di temperatura di servizio da -50 a +150 °C e con un allungamento a rottura compreso tra il 220 e il 290%. A verifica della soluzione scelta sono state eseguite specifiche analisi agli elementi finiti. La Fig. 6 mostra, ad esempio, come il flusso di calore critico avviene proprio nel punto di connessione dei pannelli; tuttavia, essendo le isoterme pressoché parallele man mano che ci si avvicina allo strato più esterno, si evince che il trasferimento di calore è essenzialmente monodimensionale, e questo indica buone prestazioni; in conclusione, la soluzione scelta permette di evitare ponti termici tra i pannelli. Dal punto di vista tecnologico, i pannelli sono stati progettati per essere fissati esternamente alla parete esistente attraverso quattro connessioni puntuali. Sull'edificio dimostrativo sono stati utilizzati in totale 492 ancoraggi in acciaio

building and ensure the necessary tolerances for the assembly and the related movement of the various elements that constitute the facade. The criticality of the joints has been solved by combining two products: a curtain cord polyethylene coupled with an acrylic silicone sealant with low modulus of elasticity. The infill bead (diameter 20 mm), not absorbing and not degradable, has allowed the filling of the junction before application of the silicone material. The coupling of this material with the acrylic sealant with low modulus has allowed the perfect sealing of the expansion joints and the connection between panels, a solution that also allows the compensation of any movement avoiding cracks and detachments. Specifically has been employed a silicone sealant neutral curing and very low elastic modulus with exceptional resistance to aging and with a service temperature range from -50 to +150 °C and with an elongation at break comprised between 220 and 290%. A verification of the solution chosen were performed specific finite element analysis. Fig. 5 shows how the critical heat flux occurs at the point of connection of the panels, however, being almost parallel to the isotherms as you get closer to the outermost layer, it means that the heat transfer is essentially 1D, and this indicates good performance. Therefore, the chosen solution allows to avoid thermal bridges between the panels. From the technological point of view, the panels are designed to be positioned externally to the existing wall through four punctual connections, represented in total from 492 stainless steel anchors of different sizes and types adjustable in the three space directions. The interspace between the panel and the existing masonry, the variable geometry as a function of the outside lead of the existing wall, has been treated to function as a non-ventilated air chamber, and then as an additional resistive layer. For this reason, it was sealed on the perimeter through self-expanding polyurethane foams combined with the sealing strips to the air.

3.3 Panels installation process

The third phase covered the installation of the technological facade system designed in the previous phase. The installation process was performed without traditional scaffolding and interference with the normal daily activities of the tenants and under different steps. The first step, regarding the anchoring tracing, has permitted to identify, from the executive project prepared on geo-referenced three-dimensional survey, the position of the anchors. For this purpose it was used a GPS total station positioned on the network designed during the

inossidabile di diversa dimensione e tipologia, regolabili nelle tre direzioni spaziali. L'intercapedine tra pannello e muratura esistente, dalla geometria variabile in funzione del fuori piombo della parete esistente, è stata trattata per funzionare come camera d'aria non ventilata e quindi come un ulteriore strato resistivo. A tale scopo, essa è stata sigillata sul perimetro attraverso schiume poliuretatiche autoespandenti combinate con nastri di tenuta all'aria.

3.3 Processo di installazione dei pannelli

La terza fase ha riguardato la messa in opera del sistema tecnologico di facciata progettato nella fase precedente. Il processo d'installazione è stato eseguito in assenza di tradizionali ponteggi, in modo da non creare disagio agli inquilini, e per fasi successive. La prima fase, di posizionamento degli ancoraggi, ha permesso di individuare, a partire dal progetto esecutivo e dal modello 3D, la posizione esatta di ogni elemento. A tal fine è stata utilizzata una stazione totale posizionata sui punti della rete definita nella fase di rilievo dell'esistente. Nella seconda fase, sono stati posizionati gli ancoraggi, suddivisi per tipologia in funzione del peso del pannello e della distanza rispetto al filo di facciata. Inizialmente sono state tracciate le posizioni dei punti corrispondenti al filo inferiore, in modo da avere un riferimento preciso per installare correttamente tutti i pannelli superiori. Prima della movimentazione è stato posizionato, sul perimetro interno di ogni elemento prefabbricato di facciata, un nastro autoespandente in polietilene per garantire l'isolamento e la tenuta del giunto tra gli stessi. La fase successiva, relativa alla movimentazione, ha permesso, tramite un apposito braccio meccanico installato su un'autogru, di avvicinare i pannelli in prossimità degli ancoraggi. Un operatore, collocato su una piattaforma aerea mobile, ha guidato la movimentazione fino al posizionamento definitivo. Successivamente, per ogni corso di pannelli, è stata eseguita la sigillatura dell'intercapedine tra muro e pannello attraverso spugne polimeriche a celle chiuse in modo da ridurre al minimo i movimenti convettivi d'aria. La fase finale, di chiusura dei giunti e di posa della lattoneria, è stata condotta sempre attraverso piattaforma mobile. Tutte le operazioni sono state eseguite in condizioni di sicurezza e di pulizia di cantiere. L'intero progetto di riqualificazione è avvenuto in tempi molto brevi, nell'arco di circa 10 settimane.

4. Valutazione delle performance del sistema

geometrical survey. In the second step the different anchors, divided by type, according to the weight of the panels and to the distance respect to the façade, were positioned. Firstly the positions of the points, corresponding to the lower row of the panels, has been identified in order to have a correct reference for the upper lines of the panels. Before their handling, a polyethylene self-expanding tape has been placed between the panels on the internal perimeter of each element to ensure the thermal isolation of the joint. The next step allowed through a special hook, installed on a crane, to lift the panels in the right position. An operator, positioned on an aerial platform, moved the panels to the final position. Subsequently, for each panel's line, it was performed the sealing of the interspace to minimize the convective air movements. The final phase, of joints' closing and guttering laying, has been always conducted through mobile platform. All the operations were carried out in conditions of absolute safety and construction site cleaning. The entire retrofitting process took place in a very short time, over 10 weeks.

4. Performance evaluation and scenarios analysis

The final solution of the prefabricated system was analyzed before its implementation on the demonstration building through detailed drawings and specific controls (Fig. 5 and 6). The models of the analysis were subsequently validated by the results of the monitoring campaign carried out both in summer and winter months. The in-situ measurements have allowed verifying the real behavior of the installed system both in terms of surface temperatures and thermal transmittance. The measuring instruments were placed on a wall portion of the housing representative, facing north-east in order to avoid the direct solar radiation effect. On the inner side wall a heat flow meter have been positioned for the measurement of heat flow with a measuring range between $-2000/+2000$ W/m² and uncertainty of 5% for 12h and a contact temperature sensor (Pt100), with a possible range $-50/+70$ °C and resolution of 0.1°C for the surface temperature measurement of the technical element. On the outer layer of the existing wall, further temperature probe has been positioned in order to monitor the behavior of an air gap between the insulating panel and masonry. Outward, another probe was applied to detect the external surface temperature of the composite panel. A thermohygrometer, through PT100 and capacitive sensor uncertainty with $\pm 1.5\%$, has allowed detecting the level of temperature and outdoor

isolante e analisi degli scenari

La soluzione esecutiva è stata analizzata prima della messa in opera attraverso disegni di dettaglio e verifiche puntuali (Fig. 5 e 6). Le analisi da modello sono state successivamente validate dai risultati della campagna di monitoraggio eseguite sia nei mesi estivi che invernali. Le misurazioni in situ hanno permesso di verificare il reale comportamento del sistema installato sia in termini di temperature superficiali che di trasmittanza termica. Gli strumenti di misura sono stati collocati su una porzione di parete rappresentativa dell'involucro, rivolta a nord-est in modo da non risentire degli effetti della radiazione solare diretta. Sul lato interno della parete sono stati posizionati un termoflussimetro per la misura del flusso termico, con campo di misura compreso tra $-2000/+2000$ W/m² e incertezza del 5% su 12h, un sensore di temperatura a contatto (Pt100), con una copertura possibile di $-50/+70$ °C e risoluzione di 0,1 °C, per la misura della temperatura superficiale dell'elemento tecnico. Sul lato esterno della muratura esistente è stata posizionata un'ulteriore sonda di temperatura al fine di monitorare il comportamento dell'intercapedine d'aria tra pannello isolante e muratura. Verso l'esterno, un'altra sonda ha permesso la rilevazione della temperatura superficiale esterna del pannello composito. Un termoigrometro, attraverso pt100 e sensore capacitivo con incertezza $\pm 1.5\%$, ha permesso di rilevare il livello di temperatura e umidità dell'aria esterna. Tutti i sensori sono stati collegati ad un datalogger impostato per l'invio dei dati ad un server ogni 6 minuti. Prima del posizionamento dei sensori, il rilievo termografico ha consentito di verificare l'omogeneità della parete in termini di temperature superficiali e l'assenza di componenti impiantistiche. Le misurazioni sono state eseguite sia durante la stagione estiva che quella invernale. Nello specifico, il grafico di Fig.7 riporta i valori misurati ed il calcolo della trasmittanza termica, calcolata con il metodo delle medie progressive in accordo con gli standard normativi vigenti⁵, per il periodo compreso tra il 19 ed il 23 dicembre 2015. Come mostrato dal grafico di Fig. 7, la trasmittanza termica rilevata è pari a 0,270 W/m²K: tale valore sta ad indicare che l'intercapedine, così come trattata, influisce positivamente sul comportamento complessivo del pacchetto tecnologico di facciata. Le temperature interne monitorate risultano in estate smorzate e attenuate rispetto alla temperatura esterna, mentre in inverno sono in media 6 °C più elevate rispetto alla temperatura ambiente.

air humidity. All sensors were connected to a data logger set for sending data to a server every 6 minutes. Before the measurement sensors placement, the thermographic survey has contributed to verify the homogeneity, in terms of surface temperatures, and the absence of system plant components. Measurements were performed during both summer and winter season. Specifically, the graph of Fig. 7 shows the measured values and the calculation of the thermal transmittance by the progressive average method in accordance with regulatory standards⁵, for the period between 19 and 23 December 2015. As shown by the graph of Fig. 7, the detected thermal transmittance is equal to 0.270 W/m²K, this value indicates that the interspace set has a positive influence on the overall behavior of the technology package facade. The internal temperatures monitored appeared muted and attenuated in summer respect to the outside temperature, while in winter they are 6°C higher, on average, than the ambient temperature.

4.1 Energy reduction scenarios

In the design phase, various retrofitting scenarios have been identified and the relative reduction of energy consumption has been measured. In the first scenario, corresponding to the only application of the prefabricated insulating panel, a reduction of primary energy demand has been estimated of 30.4%, from an energy demand of 184 to 128 kWh/m²y. In the second scenario, which considers only the replacement of existing windows with others of medium quality (U_w value of 1.4 W/m²K) and a good air tightness (3 v/h of the base case simulation to 0.6 v/h), the reduction of energy use is assessed to be about 39% with a calculated post-intervention value of 112 kWh/m²y. In the case of a combined action, as envisaged by the project, the simultaneous application of the two strategies (windows replacement and application of the insulating panels) allows a reduction of energy requirement equal to 69%, with a value of primary energy calculated to be 57 kWh/m²y corresponding to a reduction of energy equal to 127 kWh/m²y and 13 t/CO₂ avoided each year.

5. Conclusion

The paper summarizes the results of the experimental activities carried out within the European research project EASEE, aimed at demonstrating the effectiveness of an innovative modular prefabricated system for the envelope retrofitting characterized by good insulation performances and durability and a wide variability of

4.1 Scenari di riduzione del fabbisogno di energia

In fase di progetto sono stati individuati diversi scenari di riqualificazione e valutate le relative riduzioni di fabbisogno energetico. Nel primo scenario, corrispondente alla sola applicazione del pannello isolante prefabbricato, è stata stimata una riduzione del fabbisogno di energia primaria pari al 30,4% passando da un fabbisogno di energia di 184 a 128 kWh/m²a. Nel secondo scenario, in cui si prevede la sostituzione dei soli serramenti esistenti con altri di media qualità (U_w pari a 1,4 W/m²K) e con buona tenuta all'aria (da 3 v/h del caso base simulato a 0,6 v/h), la riduzione del fabbisogno di energia risulta pari a circa il 39% con un valore calcolato post intervento pari a 112 kWh/m²a. Nel caso d'intervento combinato, così come previsto dal progetto, l'applicazione contemporanea delle due strategie (sostituzione serramenti ed applicazione del pannello isolante) consente una riduzione del fabbisogno di energia pari al 69% con un valore di energia primaria calcolato pari a 57 kWh/m²a corrispondente ad una riduzione di energia pari a 127 kWh/m²a e a 13 t/CO₂ evitate ogni anno.

5. Conclusioni

Il paper ha riportato in sintesi i risultati delle attività sperimentali eseguite all'interno del progetto europeo EASEE riguardanti lo sviluppo di un sistema prefabbricato modulare innovativo per l'isolamento di facciata, con ottime prestazioni isolanti e di durabilità, e caratterizzato da un'ampia variabilità di finiture, sia per colore che per texture, in grado di riprodurre in modo fedele, ove richiesto, la facciata dell'edificio esistente. L'esecuzione dell'intervento dimostrativo ha permesso di verificare e testare in opera le soluzioni progettate, i materiali, il metodo di posa e le tempistiche di cantiere. L'esperienza maturata e le indagini eseguite hanno dimostrato un'elevata potenzialità del sistema in termini di facilità di applicazione, di performance, di qualità architettonica e di facilità di replicazione. Dal punto di vista dei costi è ancora necessaria, invece, un'ottimizzazione del processo di produzione che permetta di rendere i pannelli competitivi rispetto ai tradizionali sistemi a cappotto.

finishes for both color and textures, able to reproduce, whenever needed, the existing façade features. The implementation of the demonstration activities allowed verifying and testing on site the developed solutions, the materials, the installation method and the construction works scheduling. The lesson learned and the experimental investigations have demonstrated a high potential of the innovative system in terms of easy installation, performance, architectural quality and replicability. From the economical point of view, it is still necessary, however, an optimization of the production process so as to make competitive the prefabricated panels against a traditional External Thermal Insulation Composite System.

6. Acknowledgments

The research leading to these results has received funding from the European Union Seventh Framework Programme FP / 2007-2013 under Grant Agreement n. EeB.NMP.2011-3-285540.



Fig.1: Vista del prospetto nord-est
Fig.1: North East elevation

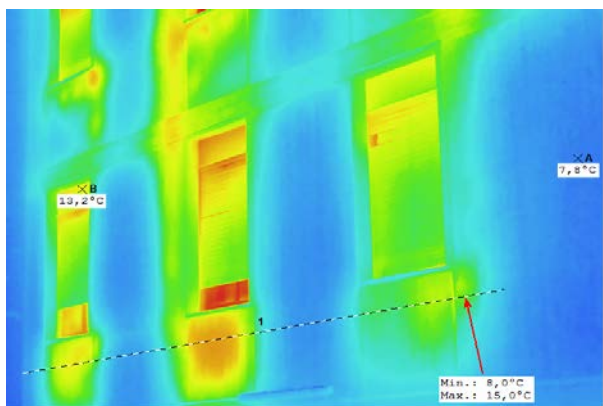


Fig. 2: Immagine radiometrica del prospetto est
Fig.2: Radiometric picture of the east elevation



Fig. 4: Rilevo dell'esistente attraverso Scanner Laser 3d
Fig. 4: Geometrical survey by means of Laser scanner 3d



Fig. 3: Prospetto est post riqualificazione
Fig. 3: East elevation after the refurbishment

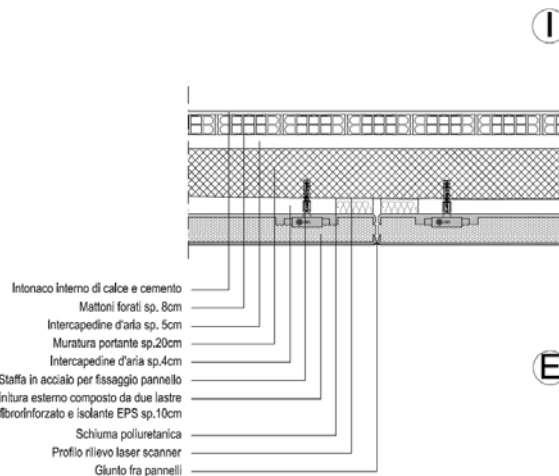


Fig. 5: Dettaglio tecnologico della chiusura verticale
Fig. 5: Technological detail of the vertical wall

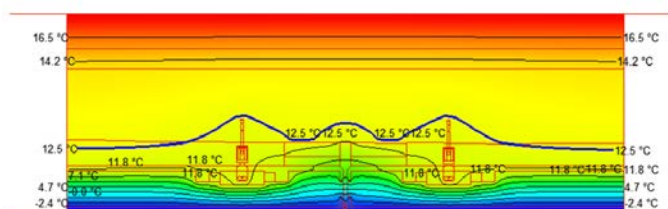


Fig. 6: Calcolo delle isoterme agli elementi finiti
Fig. 6: Isotherms calculation using finite element method

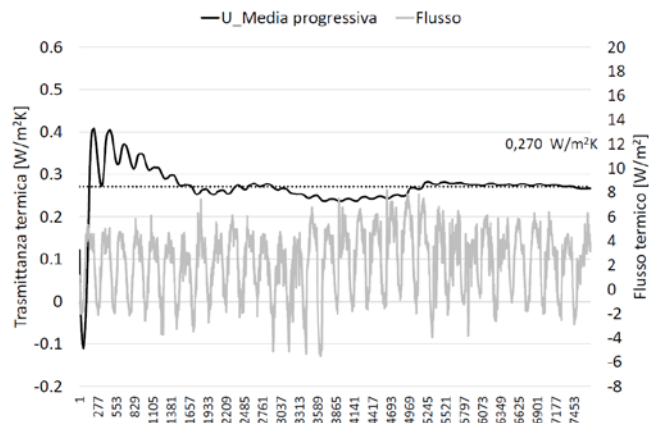


Fig. 7: Misura della trasmittanza termica
Fig. 7: Thermal transmittance measurement

NOTE

1. Law 373/1976, Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.
2. ISTAT (2011), 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni 2011.
3. CEER: Catasto Energetico Edifici Regionale. Available at: <http://www.cened.it>.
4. Decreto dirigente unità organizzativa 30 Luglio 2015, n. 6480 - Disposizioni in merito alla disciplina per l'efficienza energetica degli edifici.
5. UNI EN 1934:2000 - Prestazione termica degli edifici - Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro. ISO 9869:1994 - Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.
6. Dartwin, www.dartwin.it.
7. EASEE project: Envelope Approach to improve Sustainability and Energy Efficiency in existing multi-storey multi-owner residential buildings. www.easee-project.eu.

BIBLIOGRAFIA

- Sesana Marta Maria, Salvalai Graziano, 2013. Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. *Building and Environment*. 2013, 67, pp. 211-216.
- Autori vari, ENEA, Rapporto annuale efficienza energetica, 2015. Roma: Servizio Comunicazione ENEA, 2015. ISBN 978 88 8286 317 3.
- Colombo, I.G.; Colombo, M.; Di Prisco, M, 2015. Bending behaviour of Textile Reinforced Concrete sandwich beams in *Construction and Building Materials* 95, p. 675-685
- Iannaccone Giuliana, Salvalai Graziano, Sesana Marta Maria, Paolini Riccardo, 2014. Caratterizzazione prestazionale e sviluppo tecnologico esecutivo di pannelli prefabbricati per l'isolamento termico degli edifici esistenti, 2014, 20° congresso C.T.E., pp., 691-700.
- Iannaccone Giuliana, Salvalai Graziano, Sesana Marta Maria, Paolini Riccardo, 2016. Integrated approaches for large scale energy retrofitting of existing residential building through innovative external insulation prefabricated panels, 2016, SBE 2016 Zurich.
- Masera Gabriele, Iannaccone Giuliana, Salvalai Graziano, 2014. Retrofitting the existing envelope of residential buildings: innovative technologies, performance assessment and design methods, 2014, Advanced Building Skins 9th Energy Forum, pp., 987-994.
- Marta Maria Sesana, Manuela Grecchi, Graziano Salvalai, Caterina Rasica, 2016. Methodology of energy efficient building refurbishment: Application on two university campus-building case studies in Italy with engineering students, *Journal of Building Engineering*, Volume 6, June 2016, pp. 54-64.
- Vincenzo Corrado, Ilaria Ballarini, Simona Paduos, 2014. Assessment of cost-optimal energy performance requirements for the Italian residential building stock, *Energy Procedia*, Volume 45, pp. 443-452.