

Technological and performance issues in an intervention of retrofitting through greenery systems

Gaetano Sciuto*, Stefano Cascone, Gianpiero Evola,
Carolina Leone

Highlights

This paper deals with the retrofitting of an existing building in Mediterranean area, assessing its energy performance. The thermal benefits due to the greening systems on building roof and facades are quantified. The dynamic simulations are performed through the software DesignBuilder (version 3.4), based on the EnergyPlus calculation engine. The results show that the green facades are a suitable solution to reduce energy consumption in buildings, allowing economic savings during the operational phase.

Abstract

This research is aimed at evaluating the energy performance of an existing building in Mediterranean climate, and to assess the benefit coming from various retrofit solutions of the building envelope, such as green roof and facades. By means of dynamic simulations, validated with experimental results, the reduction in both internal air temperature and cooling load was estimated. In addition, the impact of the green shielding on the windows in terms of indoor visual comfort was assessed, and suitable solutions were envisaged.

Keywords

Building techniques, Building envelope, Vertical greenery, Energy saving, Sustainability

1. INTRODUCTION

The awareness that fossil energy resources are running out and their use causes adverse effects on both the health of people and the entire ecosystem, has led the research towards the development of new technological solutions able to reduce energy consumption and environmental pollution, given that the construction sector has a significant impact on them [1]. Therefore, it is an unavoidable necessity to retrofit and improve the energy performance of existing buildings, especially in Italy, where almost 90% of buildings have been built without effective energy saving regulations [2].

In recent years, green systems are spreading more and more thanks to the numerous researches confirming their benefits at both building and urban

Gaetano Sciuto

*DICAr - Dipartimento di
Ingegneria Civile e Architettura,
Università degli Studi di Catania,
via Santa Sofia 64, Catania,
95123, Italia*

Stefano Cascone

*DICAr - Dipartimento di
Ingegneria Civile e Architettura,
Università degli Studi di Catania,
via Santa Sofia 64, Catania,
95123, Italia*

Gianpiero Evola

*DIEEI - Dipartimento di
Ingegneria Elettrica, Elettronica
e Informatica, Università degli
Studi di Catania, viale A. Doria
6, Catania, 95125, Italia*

Carolina Leone

*DICAr - Dipartimento di
Ingegneria Civile e Architettura,
Università degli Studi di Catania,
via Santa Sofia 64, Catania,
95123, Italia*

* Corresponding author
Tel.: +39-095-7382540;
fax: +39-095-330309;
e-mail: gsciuto@dau.unicat.it

scale, such as energy saving, mitigation of urban heat island effect, increase in biodiversity and reduction in noise and atmospheric pollution [3, 4]. While there is a clear classification into intensive and extensive green roofs, it is more complex to identify a classification for the vertical green because of the different constructive systems, huge variety of plant species, different thermal behaviour, etc. Currently, they can be distinguished in two main categories: green façade and living (or green) wall [5]. In the first, the vine grows directly on the vertical surface of the building or on a screen using supporting elements such as nets made of steel, wood, plastic or aluminium. The latter category is based on hydroponics, whereby vegetation can grow without soil, thanks to the nutritional solutions contained in irrigation water. These systems consist of pockets made of geotextile fabric or prefabricated panels fixed to a vertical support or to the wall [6].

This paper aims to evaluate the energetic behaviour of a building in Mediterranean area and to quantify the contribution provided by different solutions for building envelope retrofitting, involving the adoption of green roofs and walls. Using dynamic simulation software, a variety of envelope technology solutions are examined, comparing their performance in order to assess the effectiveness of the green walls in the upgrading of existing buildings.

2. STATE OF THE ART

Each year, new buildings represent only 1-2% of the entire building heritage, so most researches aim to quantify the energy benefits of greening the envelope on existing buildings.

Castiglia Feitosa and Wilkinson [7] evaluated the thermal benefits of green roof and wall retrofit adopting lightweight modular systems in Rio de Janeiro and Sydney. The results showed that the risk of having thermal discomfort inside the building due to overheating has been reduced, thanks to the modular system of green envelope. In the research carried out by Yang et al. [8], the authors investigated the summertime cooling performance of double-skin green façade of a recently-renovated 5-storey administrative building in a university campus in Shanghai. Air temperature in the cavity between the green façade and the building wall dropped 5.5 °C for the Southern façade and 3.3 °C for the Northern façade. In addition, the maximum exterior surface temperature reduction of the Southern façade by the vertical green system was 9 °C whereas the maximum interior reduction was 2 °C. The corresponding temperature reductions of the Northern facade were 4.2 °C and 1.3 °C, respectively. Finally, maximum operative temperature reduction

1. INTRODUZIONE

La consapevolezza che le risorse energetiche fossili sono destinate a esaurirsi e che il loro continuo utilizzo provoca effetti negativi sia alla salute della popolazione, sia all'intero ecosistema, ha da tempo orientato la ricerca scientifica verso lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche in grado di ridurre i consumi e l'inquinamento ambientale, per i quali il settore delle costruzioni ha un notevole impatto [1]. Intervenire sul patrimonio edilizio esistente, riqualificandolo e migliorandone le prestazioni energetiche, è ormai una necessità ineludibile, soprattutto in un Paese come l'Italia, nel quale quasi il 90% degli edifici è stato costruito in assenza di una efficace normativa sul risparmio energetico [2].

Negli ultimi anni, i sistemi di verde verticale si stanno diffondendo sempre più grazie a numerosi studi che confermano i loro benefici sia a scala di edificio che a scala urbana: risparmio energetico, mitigazione dell'effetto di isola di calore, incremento della biodiversità, riduzione dell'inquinamento acustico e atmosferico [3, 4]. Mentre per i tetti verdi esiste già una classificazione in intensivi ed estensivi, per il verde verticale essa risulta più complessa a causa dei diversi sistemi costruttivi, della varietà delle specie vegetali, del differente comportamento termico, etc. Attualmente si tende a distinguerli in due grandi categorie, green façade e living (o green) wall [5]. Nelle prime il rampicante cresce direttamente sulla superficie verticale dell'edificio o su uno schermo avanzato, per la realizzazione del quale si ricorre a elementi di supporto come cavi o tralci in acciaio, legno, plastica o alluminio. I secondi invece si basano sulla coltura idroponica, mediante la quale la vegetazione può crescere in assenza di terreno grazie a soluzioni nutritive con cui le piante vengono irrigate. Tali sistemi sono costituiti da tasche di tessuto geotessile o pannelli prefabbricati fissati a un supporto verticale o alla struttura della parete [6].

Il presente articolo documenta una ricerca finalizzata a valutare il comportamento energetico di un edificio costruito nell'area del Mediterraneo e a quantificare l'apporto fornito da soluzioni di retrofit sull'involucro edilizio che implicano l'adozione di tetti e pareti verdi. Utilizzando un software di simulazione dinamica, vengono esaminate diverse soluzioni tecnologiche di involucro, confrontandone le prestazioni, al fine di valutare l'efficacia delle pareti verdi nella riqualificazione di edifici esistenti.

2. STATO DELL'ARTE

Annualmente, gli edifici di nuova costruzione rappresentano soltanto l'1-2% dell'intero patrimonio edilizio; per tale motivo la maggior parte delle ricerche mirano a quantificare i benefici energetici dell'applicazione di sistemi per l'inverdimento dell'involucro su edifici esistenti.

Castiglia Feitosa and Wilkinson [7] hanno valutato i benefici termici di tetti e pareti verdi in interventi di riqualificazione a Rio de Janeiro e Sydney. I risultati ottenuti evidenziano che il rischio di avere condizioni di discomfort termico all'interno dell'edificio, dovuto a eccessivo

was 2.7 °C on the South-facing office and 1.9 °C on the North-facing office. These findings suggest clear potential of vertical green systems in thermal comfort improvement and cooling energy saving. Perini et al. [9] quantified the performance of a vertical greening system located in the city of Genoa, in the Mediterranean climate of Italy, installed in 2014 on the south wall of an office building built early in the last century and renovated in the 1980's. The results demonstrated that a green layer can mitigate outdoor and surface temperatures, with difference up to 10 °C between the air extracted behind the vertical greening system and the air extracted from outside. Furthermore, the cooling capacity of vertical greening systems can be exploited to reduce energy demand for air conditioning (with a theoretical energy saving potential of 26% for summer season).

3. METHODOLOGY

The analyzed building is located in the city of Catania (37° 31' N, 15° 05' E), characterized by Mediterranean climate with hot and dry summer and mild winter (Csa, according to the Köppen and Geiger classification). The warmest months are July and August, with air temperature usually over 30 °C. Average annual rainfall is approximately 500 mm, mainly from October to March.

The building has a rectangular shape (7 x 15 m), it 4 m high and has a wooden bearing structure. The main façade, exposed to the south and free from obstacles, is made up of wooden strips forming a ventilated façade (Fig. 1). A fibre-cement canopy, built before the building, shades the roof. Inside, the building consists of a large showroom. The goal of the intervention is to convert the building into offices. Table 1 shows the stratigraphy of the existing building envelope.

surriscaldamento, si sono ridotti notevolmente grazie all'impiego di sistemi modulari leggeri di inverdimento dell'involucro. Nella ricerca condotta da Yang et al. [8], gli autori hanno investigato le prestazioni di raffrescamento estivo di una facciata verde a "doppia pelle" installata in un edificio di 5 piani destinato a uffici, recentemente riqualificato e sito nel campus universitario di Shanghai. La temperatura dell'aria nell'intercapedine tra la facciata verde e la parete dell'edificio è diminuita di 5.5 °C nel prospetto sud e di 3.3 °C in quello nord. Inoltre, sulla parete a sud si è ridotta la temperatura superficiale esterna massima di 9 °C e quella superficiale interna massima di 2 °C. Per la parete esposta a nord, tali riduzioni di temperatura sono state, rispettivamente, di 4.2 °C e 1.3 °C. Infine, la riduzione massima della temperatura operativa all'interno dell'edificio è stata di 2.7 °C negli uffici esposti a sud e di 1.9 °C negli uffici a nord. Questa ricerca dimostra l'efficacia dei sistemi di verde verticale nel miglioramento del comfort termico e nel risparmio di energia per il raffrescamento degli ambienti. Perini et al. [9] hanno valutato le prestazioni di un sistema di verde verticale a Genova, in clima mediterraneo. Tale inverdimento è stato installato nel 2014 sulla parete esposta a sud di un edificio per uffici costruito agli inizi del secolo scorso e riqualificato negli anni '80. I risultati ottenuti hanno dimostrato che la facciata verde può mitigare le temperature superficiali esterne, con differenze sino a 10 °C tra l'aria estratta dietro il sistema di verde verticale e l'aria esterna. Inoltre, il raffrescamento passivo delle facciate verdi può essere utilizzato per ridurre i consumi energetici per il condizionamento dell'edificio (con un risparmio teorico del 26% durante la stagione estiva).

3. METODOLOGIA

L'edificio oggetto di studio è ubicato nella città di Catania (37° 31' N, 15° 05' E), caratterizzata da un clima mediterraneo con estati calde e secche e inverni miti (classe Csa, secondo la classificazione climatica di Köppen e Geiger). I mesi più caldi sono luglio e agosto, quando la temperatura

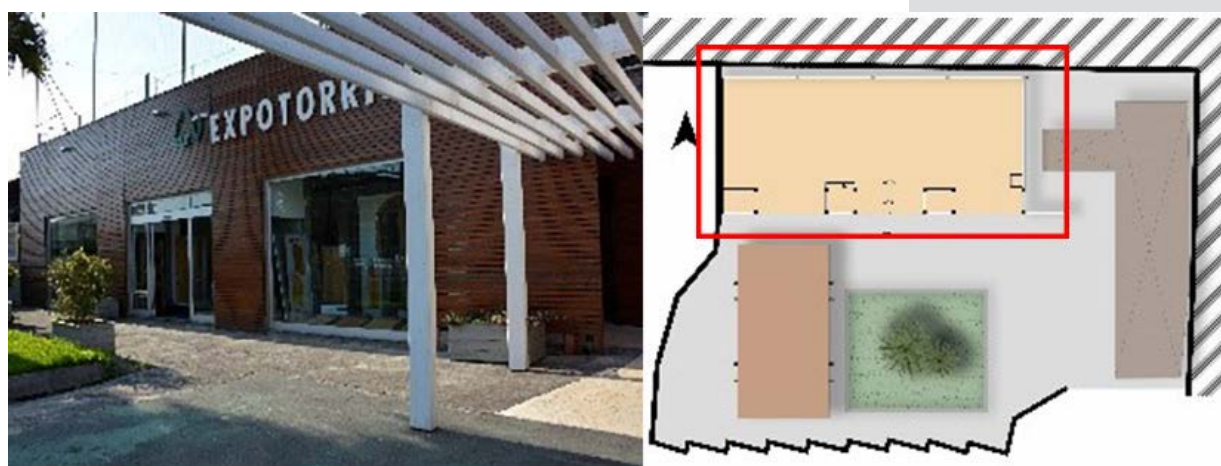


Figure 1. Southern elevation and building layout (red box).

Envelope component	Stratigraphy (from out to in)	Conductivity [W/(mK)]	Specific heat [J/(kgK)]	Density [kg/m ³]	Thickness [cm]	Transmittance [W/(m ² K)]
C.V.O.	Phenolic Multilayer	0.15	2700	550	1.8	2.86
	Plasterboard	0.21	1000	900	1.25	
C.V.T.	Low emissive glass, 16 mm + thermal-cut frame in aluminium					3.1
C.O.C.	FIR plywood	0.12	1380	510	1.4	3.16
	Plasterboard	0.21	1000	900	1.25	
C.O.B.	Concrete	1.13	1000	2000	29	2.22
	Parquet	0.14	1200	650	1.5	

Table 1. Stratigraphy of the existing envelope.

3.1. DATA COLLECTION

The environmental parameters were measured by means of the microclimatic acquisition unit TESTO 480, located in the centre of the room and connected to a probe for the average radiant temperature (globothermometer) and a probe to measure the indoor air temperature. The uncertainty of these probes is 1 °C and 0.5 °C, respectively. The outdoor air temperature was measured by a weather station less than one kilometre away from the building. Data acquisition was performed between 18th and 21st July 2017, at a 5-minute interval. During this period, no activity was carried out inside the building and the entrance was only opened during the afternoon of 19th and 20th July, from 14:30 to 18:00. In order to perform a dynamic simulation using DesignBuilder, the indoor air temperature was used to validate the model of the building.

3.2. BUILDING RETROFITTING

In order to ensure the environmental comfort for the activities foreseen by the new use, as well as the air conditioning systems, it is advisable to improve the thermal performance of the opaque envelope, also by removing the existing canopy in fibrocement. The technological solutions for the building envelope retrofitting were designed taking into account the limits in thermal transmittance prescribed by D.M. 26 June 2015 for Catania (climatic zone B).

Green roof

In place of the existing flat roof, an extensive green roof was designed with sedum as vegetation. This ensures a good thermal insulation of the building envelope, as it reduces heat losses in winter and limits overheating in summer. Moreover, because of its reduced thickness and lightness, the extensive green roof is suitable for the upgrading of existing buildings with flat roof capable of supporting reduced loads. In Mediterranean climate, this system requires low maintenance and an irrigation system due to the summer drought. Fig. 2 shows green roof stratigraphy.

dell'aria supera solitamente i 30 °C. Le precipitazioni medie annue si aggirano intorno ai 500 mm, principalmente da ottobre a marzo.

L'edificio ha un perimetro rettangolare di 7 x 15 m, è alto 4 m, e presenta ossatura portante in legno. Il fronte principale, rivestito da una facciata ventilata costituita da listelli in legno, ha esposizione a sud ed è privo di ostacoli (Fig. 1). Una tettoia in fibrocemento, preesistente alla costruzione dell'edificio, ne ombreggia la copertura. All'interno il fabbricato consta di un unico grande ambiente che ospita uno showroom. L'obiettivo del retrofit è convertire la struttura in uffici. La tabella 1 mostra la stratigrafia dell'involucro edilizio esistente.

3.1. LA RACCOLTA DATI

Per la misurazione dei parametri ambientali interni si è fatto ricorso alla centralina microclimatica TESTO 480, posizionata al centro del locale, collegata a una sonda per la misura della temperatura media radiante (globotermometro) e a una sonda per la misura della temperatura dell'aria. L'incertezza delle due sonde è rispettivamente di 1 °C e di 0.5 °C. La temperatura dell'aria esterna è stata invece ricavata da una stazione meteorologica situata a meno di un chilometro dall'edificio. L'acquisizione dei dati è avvenuta tra il 18 e il 21 luglio 2017, a intervalli di 5 minuti. Durante le misure non sono state svolte attività all'interno dell'edificio e la porta d'ingresso è stata aperta solo nei pomeriggi del 19 e 20 luglio, dalle 14:30 alle 18:00.

I valori di temperatura dell'aria interna sono stati utilizzati per validare il modello dell'edificio costruito su DesignBuilder ai fini della simulazione dinamica.

3.2. L'INTERVENTO DI RETROFIT

Al fine di assicurare il comfort ambientale adeguato per lo svolgimento delle attività previste dalla nuova destinazione d'uso, oltre che ricorrere all'installazione di impianti di climatizzazione, è opportuno intervenire sull'intero involucro opaco per migliorarne le prestazioni termiche, procedendo altresì alla rimozione della preesistente tettoia in fibrocemento. Gli elementi di fabbrica sono stati progettati tenendo conto dei valori limite di trasmittanza termica per la zona climatica B (nella quale ricade la città di Catania) fissati dal D.M. 26 giugno 2015.

Chiusura orizzontale di copertura: il tetto verde
In sostituzione dell'attuale copertura

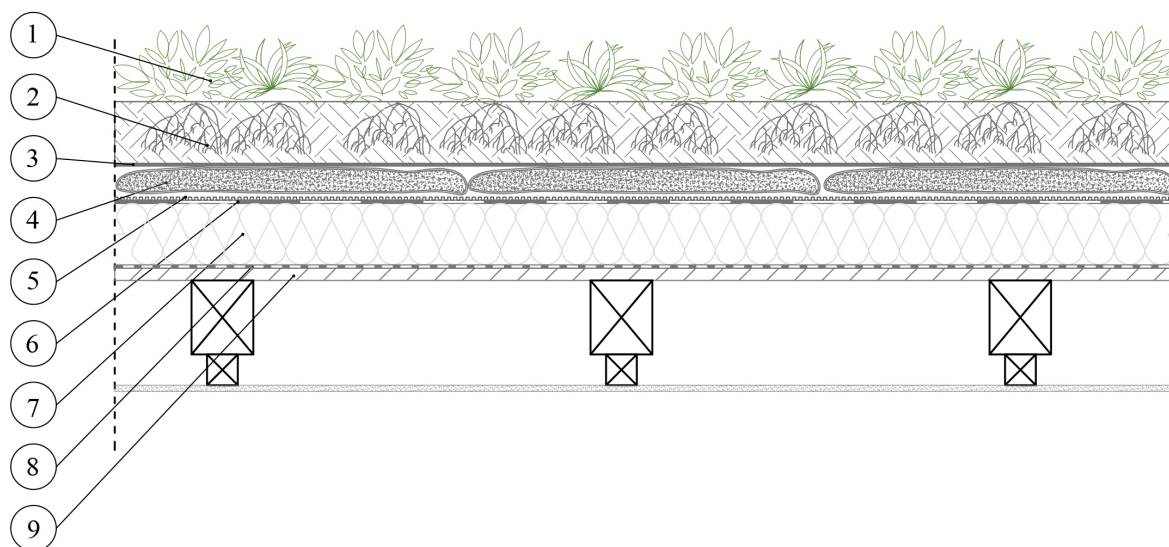


Figure 2. Flat roof stratigraphy: 1-Sedum; 2-substrate; 3-filter layer; 4-drainage layer; 5-protection layer; 6-anti-root and waterproof membrane; 7-thermal isolation; 8-vapour barrier; 9-OSB.

Green façade

The green façade (Fig. 3) consists of a steel and wood support system on which a deciduous creeper grows, shielding the façade from direct sunlight during summer months. The essence is the Canadian vine (*Parthenocissus Quinquefolia*), characterized by a dense foliage with different colors depending on the season. The support system is about 20 cm from the building, thanks to steel profiles placed at the base and on top of the wooden bearing structure, connected by means of small diameter screws. The wooden strips, placed with a minimum inclination to avoid the stagnation of rainwater, are hung from a steel cable stretched between the two metallic profiles, at 15 cm. In front of the openings, the wheelbase between the strips rises to 45 cm to thin out the vegetation and allow a better illumination of the interior spaces, while guaranteeing the shielding of the windows. At the main entrance, a wooden portal, protruding 70 cm from the façade, protects the opening from the solar radiation (Fig. 4).

The anchorage adopted guarantees the non-invasiveness of the intervention and allows to install the green façade on any building and constructive system (wood, concrete, steel, masonry) by means of punctual dry connection to the bearing structure. It consists of two small steel profiles (Fig. 5): The 21.5 cm long hollow profile, to which the green façade is hung, is welded to a 12 cm diameter plate to transfer the weight of the green wall to the building bearing structure. The fastening is made by four semi-threaded screws with a self-tapping tip and a notch that avoids the risk of cracks in the wood. Moreover,

piana è stato progettato un tetto verde di tipo estensivo con vegetazione a sedum. Ciò assicura un buon isolamento termico dell'involucro, in quanto riduce le dispersioni di calore in inverno e ne limita il surriscaldamento in estate. Inoltre, per il suo ridotto spessore e per la sua leggerezza, il tetto verde estensivo è indicato per interventi su edifici esistenti, e in particolare su coperture piane in grado di sostenere carichi ridotti. Tale sistema richiede una modesta manutenzione ma, in clima mediterraneo, necessita di un impianto di irrigazione per sopperire alla siccità estiva. In Fig. 2 se ne riporta la stratigrafia.

La green façade

La green façade progettata (Fig. 3) è costituita da un sistema di supporto in acciaio e legno sul quale cresce un rampicante caducifoglie che durante i mesi estivi scherma la facciata dalla radiazione solare diretta. L'essenza prevista è la vite canadese (*Parthenocissus quinquefolia*), caratterizzata da un fogliame molto denso che assume colorazioni diverse dalla primavera all'autunno. Il sistema di supporto è indipendente dalla chiusura verticale opaca e si distanzia da questa di circa 20 cm grazie a profili in acciaio posti alla base e in sommità dello scheletro portante in legno, collegati tramite viti di piccolo diametro. I listelli di legno, posti di piatto con una minima inclinazione per evitare il ristagno dell'acqua piovana, sono appesi con un interasse di 15 cm a un cavo d'acciaio teso tra i due profili metallici. In corrispondenza delle aperture, l'interasse tra i listelli aumenta a 45 cm per diradare la vegetazione e consentire, oltre alla schermatura delle superfici vetrate, una migliore illuminazione degli spazi interni. In corrispondenza dell'ingresso principale, un portale in legno, che sporge di 70 cm rispetto alla facciata, protegge l'apertura dalla radiazione solare (Fig. 4).

Il sistema di ancoraggio adottato

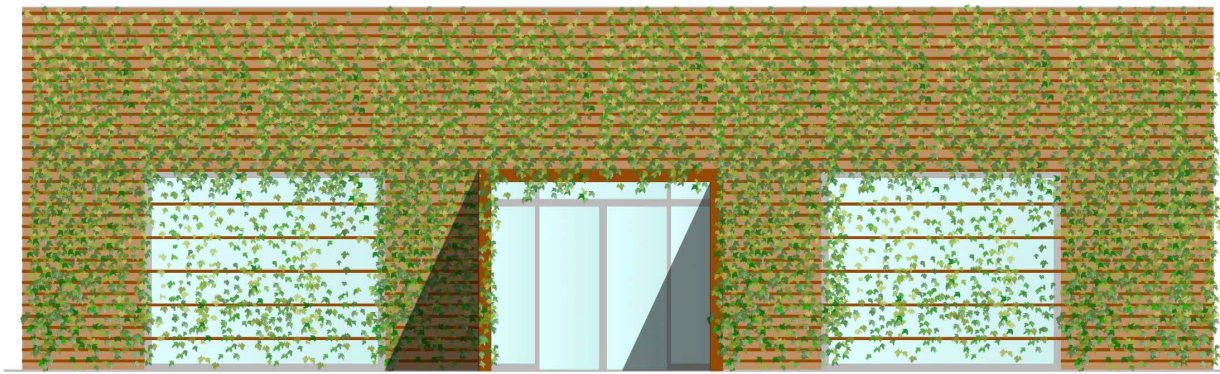


Figure 3. Main Elevation.

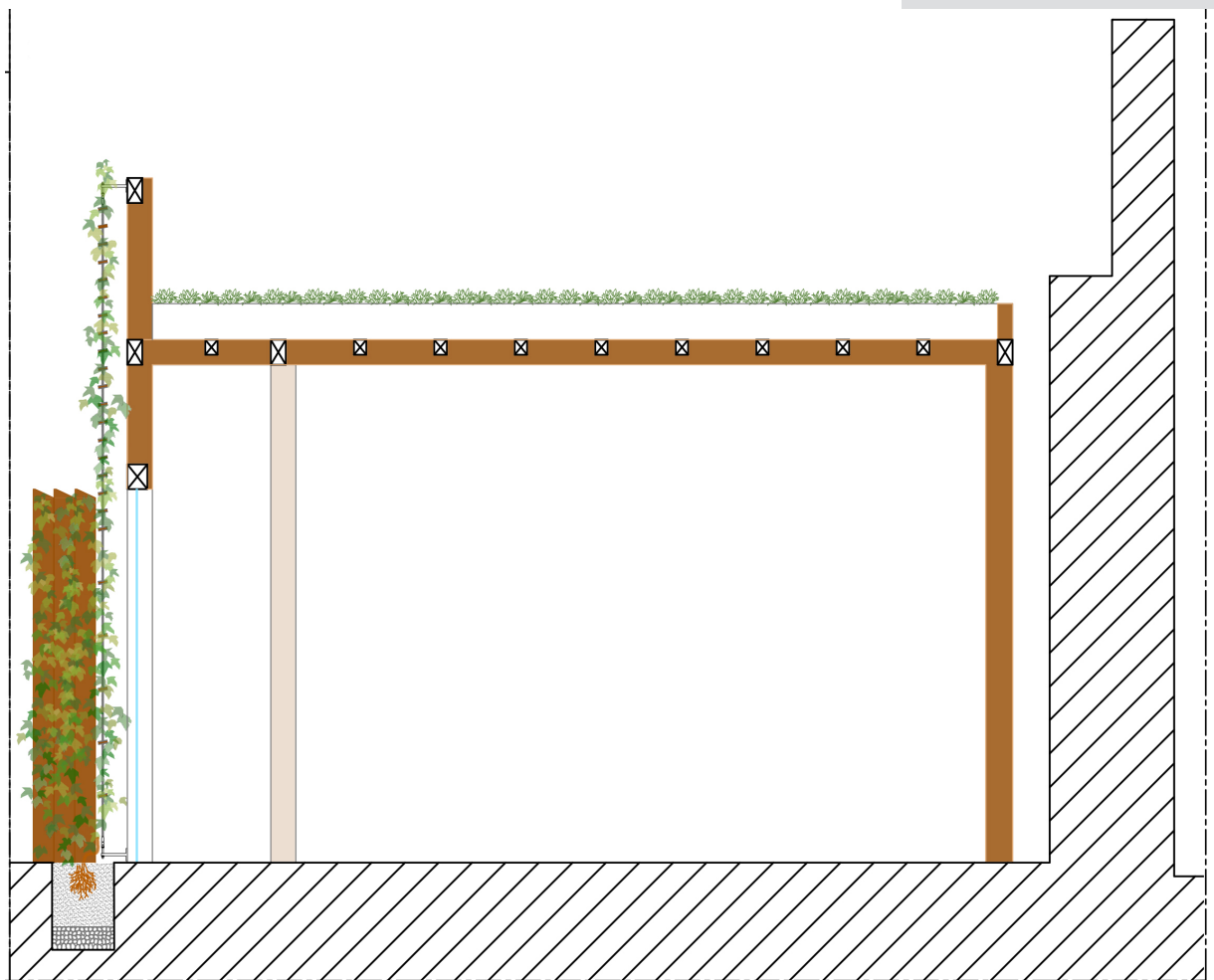


Figure 4. Trasversal section.

the asymmetrical “umbrella” thread allows a greater penetration into the wood.

In order to guarantee static safety, the steel profile was verified to withstand the stresses produced by the loads. Specifically, the tubular profile was verified by bending while the semi-packed screws were tested for traction and cutting. The total load is 11.6 kg/m^2 and considers the weight of the profile, steel cable ($F = 6$), wooden strips and creeper.

garantisce la non invasività dell'intervento e permette di giustapporre la green façade a qualsiasi tipologia di edificio e di sistema costruttivo (legno, calcestruzzo, acciaio, muratura) mediante collegamento puntuale a secco alla struttura portante. Esso è costituito da due profili in acciaio INOX 316 di piccole dimensioni (Fig. 5): il profilo cavo lungo 21,5 cm a cui viene appesa la green façade è saldato a un piatto, di diametro 12 cm, che ha il compito di trasferire i carichi della parete verde alla struttura portante dell'edificio.

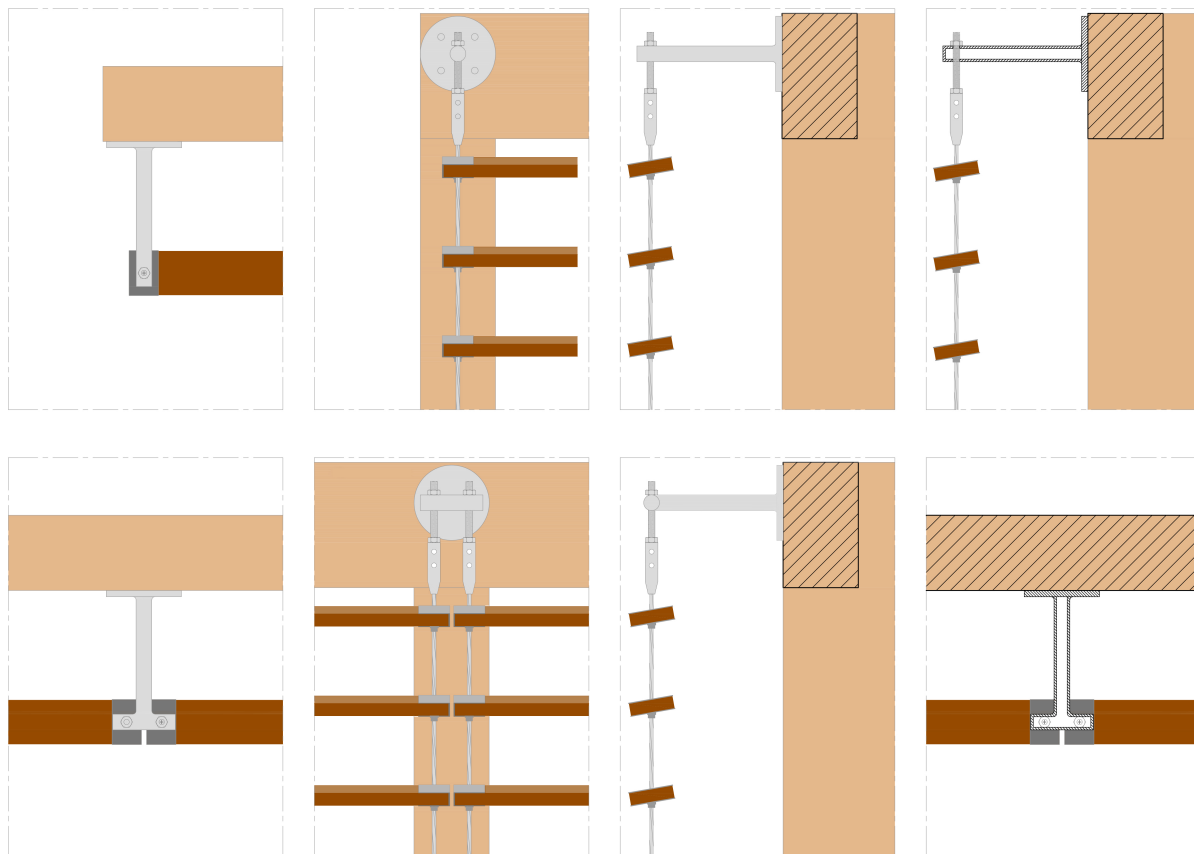


Figure 5. Front and side view of the connection.

3.3. THE SCENARIOS

In order to assess the energy behaviour of the building and to identify the solution that allows maximum energy saving, six scenarios (S1, S2, S3.A, S3.B, S4.A, S4.B) for retrofitting the existing building envelope were considered (Fig. 6).

In the S1 scenario, a traditional retrofit solution is considered, based on the use of common materials and aimed at respecting the thermal transmittance defined by Italian regulations. In S2, the green roof is introduced. In the S3 scenario, the green façade was placed to shade the south facing wall.

A low foliage density, with a solar transmission coefficient of 0.4 for walls and 0.8 for windows was provided to ensure better daylighting in the interior space (scenario S3.A). Instead, in the S3.B scenario, denser foliage is supposed with solar transmission coefficient of 0.2 for walls and 0.6 for windows. Finally, S4 combines the green roof and the green façade. Table 2 provides the stratigraphy of all envelope components.

Il fissaggio avviene tramite quattro viti semifletrate a testa svasata con una punta autoforante dotata di un particolare intaglio che evita il rischio di spaccature nel legno. Inoltre il filetto asimmetrico, ad ombrello, permette una maggiore penetrazione nel legno. Al fine di garantire la sicurezza statica, il profilo in acciaio è stato verificato alle sollecitazioni prodotte dai carichi agenti. Nello specifico la sezione del profilo tubolare è stata verificata a flessione e le viti semifletrate sono state verificate a trazione e a taglio. Il carico totale a cui è stato verificato è di 11.6 kg/m² e tiene conto del peso proprio del profilo, del cavo d'acciaio ($F = 6$), dei listelli di legno e del rampicante.

3.3. GLI SCENARI

Per valutare il comportamento energetico dell'edificio e identificare la soluzione che consente il massimo risparmio energetico, sono stati ipotizzati sei scenari (S1, S2, S3.A, S3.B, S4.A, S4.B) per la ristrutturazione dell'involucro dell'edificio esistente (Fig. 6).

In S1 si considera un intervento tradizionale finalizzato al rispetto dei limiti di trasmittanza definiti dalle normative italiane. In S2 viene introdotto il tetto giardino. In S3 è stata collocata la green façade per ombreggiare la parete esposta a sud: in particolare, in S3.A è stata ipotizzata

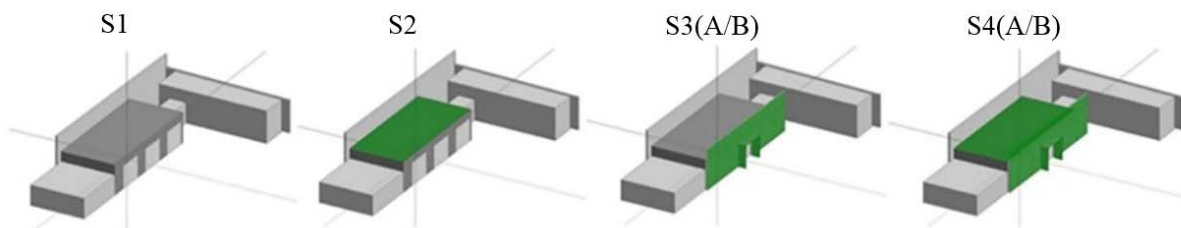


Figure 6. Schematization of the different retrofit solutions proposed.

Scenario	Envelope component	Stratigraphy (exterior-interior)	Conductivity [W/(mK)]	Specific heat [J/(kgK)]	Density [kg/m ³]	Thickness [cm]	Transmittance [W/(m ² K)]	
S1	C.V.O.	Plasterboard	0.32	1100	1150	1.25	0.26	
		Wood fibre insulation	0.065	1810	360	3.5		
		OSB panel	0.1	1700	530	1.5		
		Wood fibre insulation	0.038	2100	160	10		
		OSB panel	0.1	1700	530	1.5		
		Vapor barrier						
		Air gap	0.55	1000	1000	2		
	Plasterboard	0.32	1100	1150	1.25			
	C.O.C.	Metal sheet	45	420	7680	0.05	0.31	
		Ventilated cavity	0.55	1000	1000	5		
		OSB panel	0.1	1700	530	2		
		Wood fibre insulation	0.038	2100	160	10		
		OSB panel	0.1	1700	530	2		
		Plasterboard	0.32	1100	1150	1.25		
S2	C.V.O.	S1					0.26	
	C.O.C (tetto verde)	Sedum					0.31	
		Substrate	0.44	880	950	10		
		Filter and drainage layer						
		Waterproof membrane						
		Wood fibre insulation	0.038	2100	160	10		
OSB panel	0.1	1700	530	2				
Plasterboard	0.32	1100	1150	1.25				
S3.A-	C.V.O.	Green façade + S1					0.26	
S3.B	C.O.C.	S1					0.31	
S4.A-	C.V.O.	S3.A-S3.B					0.26	
S4.B	C.O.C.	S2					0.31	

Table 2. Stratigraphy and thermal properties in different scenarios.

3.4. SETTINGS FOR THE SIMULATIONS

The main parameters considered in this study are the indoor dry-bulb temperature, the temperature of the inner surface in the wall facing South, and the energy demand for space cooling. These parameters are determined by means of dynamic thermal simulations in DesignBuilder (version 3.4), a well-known software tool based on the calculation engine of EnergyPlus.

In particular, the temperature trends are obtained through free running simulations and refer to three days (18th to 21st July). On the other hand, the energy demand is an outcome of other simulations performed over the whole summer season (from 1st June to 30th September) under a thermostat condition for the indoor temperature, set to 26 °C. In the simulations, the cooling system

una minore densità del fogliame, con coefficiente di trasmissione solare pari a 0,4 in corrispondenza delle pareti e a 0,8 in corrispondenza delle finestre per garantire una migliore illuminazione naturale dello spazio interno. Al contrario, in S3.B è stato supposto un fogliame più denso, definito da un coefficiente di trasmissione solare di 0,2 sulle pareti e di 0,6 sulle finestre. Infine, S4 combina il tetto giardino e la green façade. La tabella 2 fornisce la stratigrafia dettagliata di tutti i componenti.

3.4. SETTAGGI DELLA SIMULAZIONE

I parametri analizzati in questo studio sono la temperatura interna dell'aria, la temperatura superficiale interna della facciata sud e il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva dei locali. Tali parametri sono stati determinati utilizzando il software di simulazione dinamica DesignBuilder

is turned on only during the working time, i.e. from Monday to Friday, 9:00-13:00 and 16:00-19:00.

4. RESULTS

Figure 7 shows that the indoor air temperature rapidly increases from 7 a.m., when the solar radiation starts hitting the facade of the building. Some fluctuations in the temperature trend occur in the afternoon, probably due to the opening of the entrance door. At night, the indoor temperature shows a constant decrease.

The outcomes of the dynamic simulations are reliable; indeed, it is possible to observe a good matching between the measured and the simulated trends, since their maximum difference is around 1 °C at night.

In a preliminary stage the thermal performance of the building has been investigated also without the asbestos cover on top of the roof (CS2 curve in Fig. 7): actually, this must be removed and will not be in place in the scenarios described in Table 2. The curves in Fig. 7 suggest that this cover plays a fundamental role, and its removal would cause a considerable increase in the indoor temperature (around 4 °C), due to the consequent overheating of the roof.

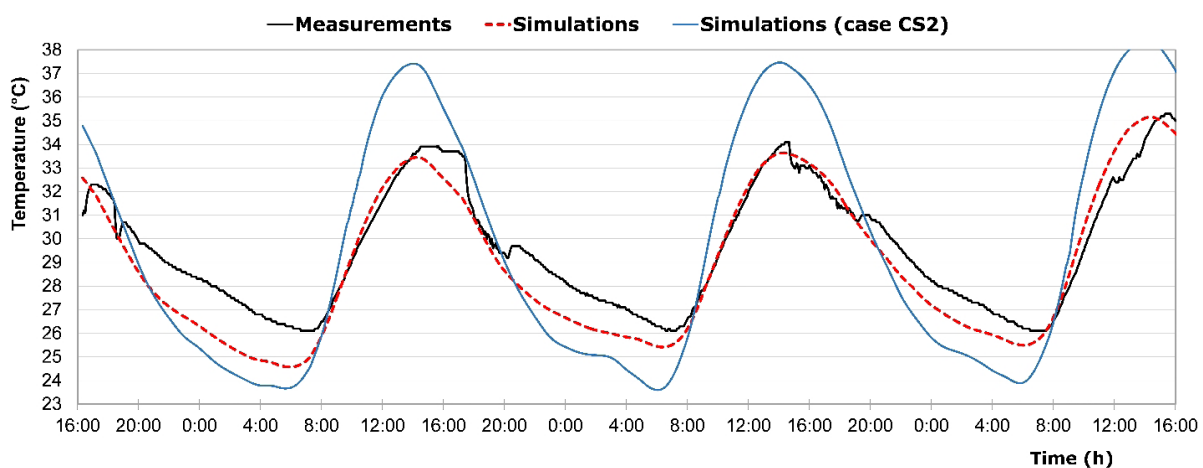


Figure 7. Validation of the simulation model in DesignBuilder.

4.1. AIR TEMPERATURE AND SURFACE TEMPERATURE

Table 3 shows the peak values for the indoor temperature in the different scenarios. In the S1 scenario, i.e. when the energy retrofit of the building is realized by means of traditional thermal insulation and without green roofs or green facades, the internal peak temperature decreases with respect to the CS2

(versione 3.4), che si basa sul motore di calcolo EnergyPlus.

In particolare, i profili delle temperature sono stati analizzati effettuando la simulazione in condizioni di free running nei giorni tra il 18 e il 21 luglio. Il fabbisogno energetico è stato invece calcolato per tutto il periodo estivo (dal 1° giugno al 30 settembre) imponendo la presenza di un impianto di raffrescamento che mantenga la temperatura interna a 26 °C. L'impianto è considerato in funzione solo negli orari di lavoro (dal lunedì al venerdì, 9:00-13:00 e 16:00-19:00).

4. RISULTATI

La Fig. 7 mostra che la temperatura dell'aria interna aumenta rapidamente a partire dalle 7:00, quando la radiazione solare colpisce l'edificio. Le lievi irregolarità del profilo di temperatura rilevate durante il pomeriggio sono probabilmente dovute all'apertura e alla chiusura della porta d'ingresso. Durante la notte la temperatura continua a diminuire fino all'alba. Inoltre, sono stati osservati picchi di temperatura dell'aria interna ed esterna quasi in fase, a causa della scarsa inerzia termica dell'involucro esistente.

Gli esiti delle simulazioni dinamiche condotte con DesignBuilder sono soddisfacenti, in quanto si rileva una buona corrispondenza tra la temperatura dell'aria interna misurata e quella simulata, con differenze inferiori a un 1 °C nelle ore notturne.

In fase preliminare il comportamento dell'edificio è stato valutato anche in assenza della copertura in fibrocemento che ombreggia la struttura (curva CS2

in Fig. 7): essa dovrà essere in ogni caso rimossa, e non sarà dunque presente negli scenari introdotti in Tabella 2. Le curve di Fig. 7 dimostrano che tale copertura gioca un ruolo fondamentale: senza di essa, la temperatura interna aumenterebbe di circa 4 °C, a causa del surriscaldamento del tetto.

4.1. TEMPERATURA DELL'ARIA E TEMPERATURA SUPERFICIALE

La Tabella 3 riporta i valori di picco

scenario (see previous section) from 38.4 °C to 34.9 °C. The S1 solution also guarantees a lower temperature fluctuation, with a maximum daily oscillation of about 6 °C (Fig. 8).

In the S2 scenario, i.e. when adopting a green roof, the internal temperature does not vary significantly compared to the S1 solution, and the peak value is lowered by about 0.3 °C. This reduced variation highlights the effectiveness of micro-ventilation in the S1 scenario for the sheet metal roof, preventing overheating in the lower layers. These results show that the installation of the green roof cannot be justified only from an energetic point of view.

The solution that implies the lowest indoor temperature is the S4.B scenario, with the simultaneous presence of the green roof and the green façade with the densest foliage. In this case, the peak indoor temperature is reduced to 32.9 °C, i.e. 2 °C less than the S1 scenario.

per la temperatura interna nei diversi scenari ipotizzati. Nella soluzione S1, cioè qualora si provveda alla riqualificazione energetica dell'edificio con soluzioni di isolamento termico tradizionali e senza l'adozione di coperture o facciate verdi, la temperatura interna di picco diminuisce rispetto al caso CS2, discusso nella sezione precedente, da 38,4 °C a 34,9 °C. La soluzione S1 garantisce inoltre una minore fluttuazione della temperatura, con oscillazioni giornaliere di ampiezza massima pari a circa 6 °C (Fig. 8).
Nello scenario S2, cioè adottando una copertura a verde, la temperatura interna non varia in modo rilevante se paragonata alla soluzione S1, ed il valore di picco si abbassa di circa 0,3 °C. Questa variazione piuttosto limitata evidenzia l'efficacia della micro-ventilazione prevista nello scenario S1 per il tetto in lamiera, in grado di impedire il surriscaldamento degli strati inferiori. Alla luce di questi risultati, l'installazione del tetto verde non può essere giustificata solo da un punto di vista energetico.

CS1	CS2	S1	S2	S3.A	S3.B	S4.A	S4.B
35.1 °C	38.4 °C	34.9 °C	34.6 °C	33.7 °C	33.2 °C	33.4 °C	32.9 °C

Table 3. Internal peak temperature for the different scenarios analyzed.

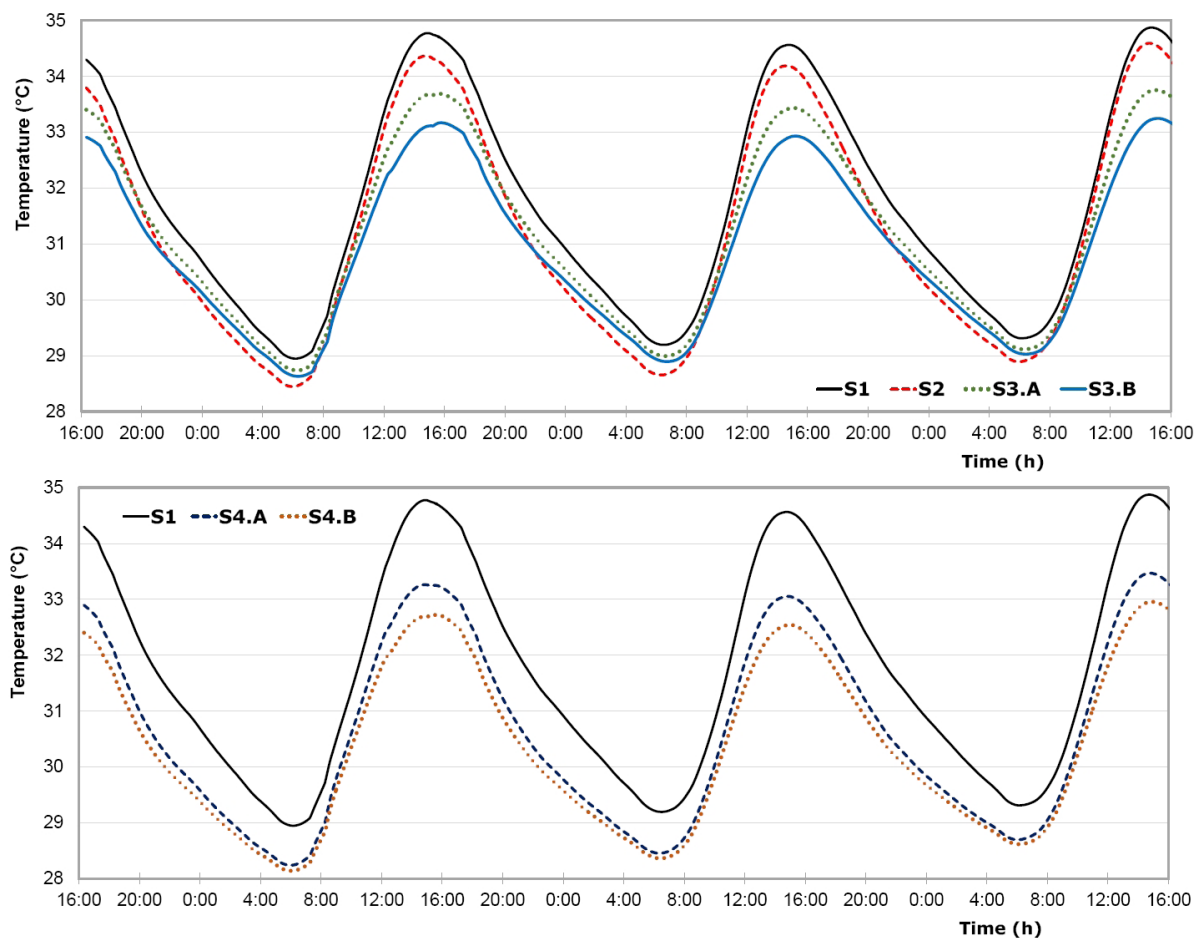


Figure 8. Indoor temperature profile for the proposed scenarios.

However, without green roof (S3.B scenario) the results are quite similar. Conversely, a lower density of foliage (S4.A scenario) may result in a significant decrease in performance, with an internal temperature increase of up to 0.5 °C compared to the optimum setting (S4. B).

Another benefit of the green façade is the reduction in the surface temperature of the outer wall. The results suggest that the S3 scenario has a reduction in the internal surface temperature above 1 °C. The higher density of foliage provides a further but negligible reduction in surface temperature.

4.2. ENERGY DEMAND FOR SPACE COOLING

Figure 9 reports the cooling energy demand in kWh/m², as an output of the dynamic simulations in DesignBuilder under thermostatic control at 26 °C. In the current state (CS1), the energy demand is 27.9 kWh/m², but it would increase by around 70 % after the removal of the asbestos cover (CS2).

In all the proposed retrofit scenarios, the energy demand would decrease by at least 56% if compared to the current state (CS1), see Table 4. In comparison to scenario S1, i.e. a retrofit solution based on traditional techniques, the scenario S4.B (green roof plus green façade with high-density foliage) can lead to a reduction by 36%. In this case, the density of the foliage plays a non-negligible role.

La soluzione in assoluto più prestante, cioè quella che garantisce i valori più bassi della temperatura interna, è costituita dallo scenario S4.B, in cui si riscontra la presenza contemporanea della copertura a verde e della green façade con il fogliame più denso; in questo caso la temperatura interna di picco si riduce a 32.9 °C, cioè 2 °C in meno rispetto allo scenario S1. Tuttavia, l'eliminazione del tetto verde (soluzione S3.B) non modifica significativamente i risultati. L'adozione di una densità minore per il fogliame (soluzione S4.A) può invece comportare un peggioramento non trascurabile, con aumento della temperatura interna fino a 0.5 °C rispetto al caso ottimale (S4.B). Un altro beneficio della facciata vegetale consiste nella riduzione della temperatura superficiale della parete esterna. I risultati suggeriscono che gli scenario S3 comportano una riduzione della temperatura superficiale interna di poco superiore ad 1°C. La maggiore densità di fogliame fornisce un'ulteriore ma trascurabile riduzione della temperatura superficiale

4.2. CARICO DI RAFFRESCAMENTO

La Fig. 9 mostra i fabbisogni energetici estivi per il raffrescamento dei locali, espressi in kWh/m², determinati tramite le simulazioni dinamiche condotte con DesignBuilder sotto l'ipotesi che sia presente un controllo termostatico a 26 °C. Allo stato di fatto (CS1), il fabbisogno di raffrescamento ammonta a 27.9 kWh/m², ma in assenza della copertura in fibrocemento (CS2) esso aumenterebbe di circa il 70%. Per tutti gli scenari di retrofit proposti il fabbisogno energetico diminuisce

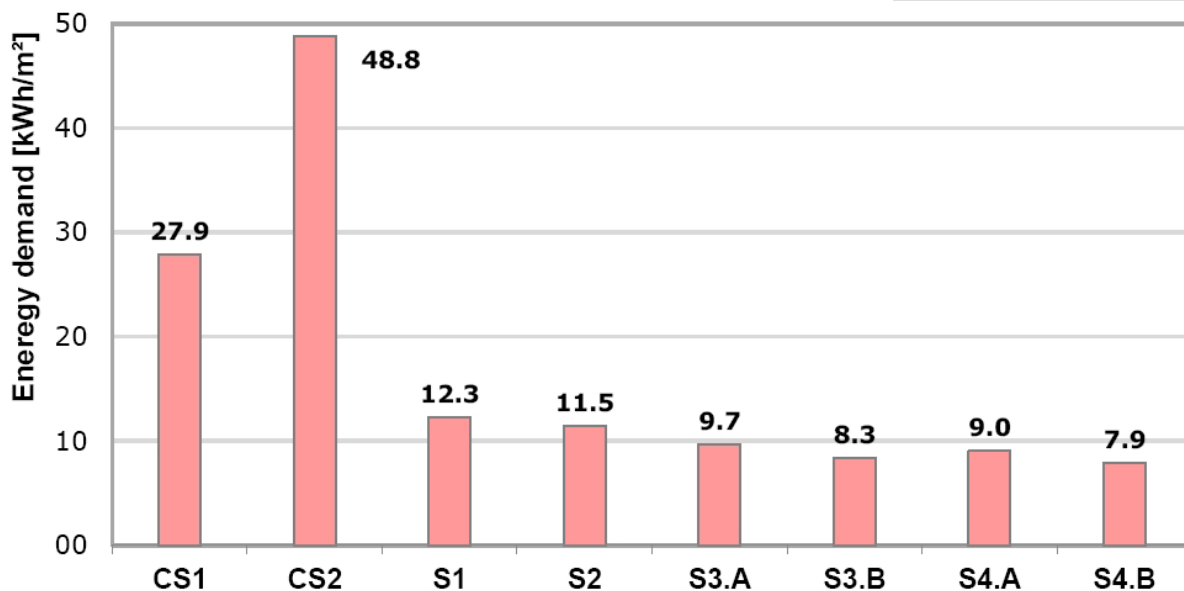


Figure 9. Energy demand for space cooling.

	S1	S2	S3.A	S3.B	S4.A	S4.B
Starting from the current state (CS1)	56%	59%	65%	70%	68%	72%
Starting from solution S1	-	7%	21%	32%	27%	36%

Table 4. Percentage reduction in the energy demand for space cooling.

4.3. DAYLIGHTING

The installation of the green façade as a screen for the two side glazed doors significantly reduces the solar heat gains, but it is also likely to influence the availability of daylight on the working plane.

For this reason, further simulations were performed with the aim of verifying the indoor daylight availability. The simulations were still run on DesignBuilder, thanks to its “Daylighting” module based on the Radiance calculation engine. As an output, it is possible to read the indoor illuminance values as well as the Daylight Factor. It is then useful to recall the definition of Daylight Factor (DF): this is the ratio of the daylight illuminance measured on a point of the working plane (E_p) to the daylight illuminance measured, in the same time, over a horizontal plane with no obstructions (E_0):

$$DF = E_p / E_0$$

The Daylight Factor allows to “normalize” the indoor daylight illuminance in relation to the maximum simultaneous daylight availability. Its value is always lower than the unity, and can also be expressed as a percentage; mean values between 3% and 5% are satisfying.

The new simulations were run for four different days (January 21st, April 21st, July 21st and October 21st) under partially cloudy sky conditions. As an example, Fig. 10 shows the results in January and July: the plots refer to the map of the Daylight Factor over a horizontal plane at 75 cm above the ground. The figures also include the simultaneous illuminance values measured outdoors (E_0).

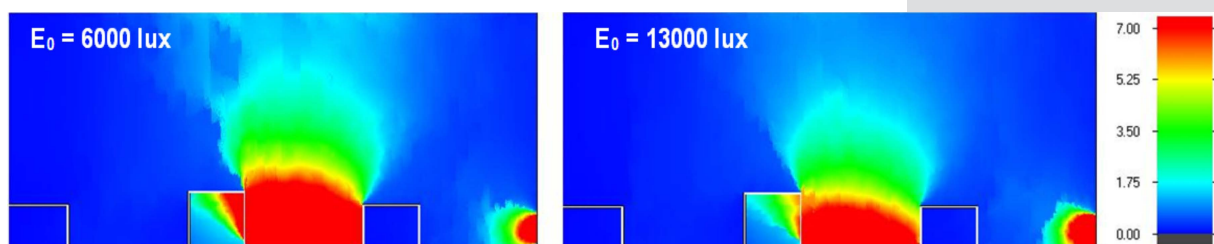


Figure 10. Daylight Factor map in case of green façade installation (percentage values).
Left: 9 a.m., January 21st. Right: 9 a.m., July 21st.

The results reported in Fig. 10 show a pronounced disuniformity in the distribution of daylight on the working plane. Indeed, very high DF values are obtained close to the entrance door ($4\% < DF < 7\%$), but in the remaining areas the DF is well below 1%, which suggests insufficient daylight availability.

Indeed, if one looks at the simultaneous values of E_0 reported in the figures and then applies the definition of DF, the resulting illuminance values in most of the points would not reach 60 lux in January, or 130 lux in July, while

invece in modo considerevole rispetto allo stato di fatto (CS1), con una riduzione compresa tra il 56% e il 72% (Tabella 4). La riduzione del carico di raffrescamento rispetto allo scenario S1 (riqualificazione dell'involucro con soluzioni tradizionali) può giungere invece al 36% nello scenario che combina il tetto e la facciata verde con un fogliame più denso (S4.B). L'impatto della percentuale di fogliame è non trascurabile.

4.3. ANALISI ILLUMINOTECNICA

L'utilizzo della vegetazione con funzione schermante in corrispondenza delle due vetrate laterali evidenziate in Fig. 3 contribuisce certamente a ridurre i guadagni solari, ma può avere conseguenze negative sulla fruizione della luce naturale negli ambienti. Per verificare la disponibilità di luce naturale nell'ambiente interno sono state quindi eseguite ulteriori simulazioni sfruttando il modulo "Illuminazione Naturale" di DesignBuilder. Esso è in grado di calcolare le mappe di illuminamento all'interno degli ambienti e i corrispondenti valori del fattore di luce diurna, appoggiandosi all'avanzato motore di simulazione illuminotecnica Radiance.

Il fattore di luce diurna (DF) rappresenta il rapporto tra l'illuminamento naturale misurato in un punto all'interno del locale (E_p) e l'illuminamento misurato, nello stesso istante, in un punto posto all'esterno dell'edificio su un piano orizzontale privo di ostruzioni (E_0):

$$DF = E_p / E_0$$

Il fattore di luce diurna consente quindi di "normalizzare" l'illuminamento naturale all'interno del locale rispetto alla contemporanea massima disponibilità di luce naturale. Il suo valore è minore dell'unità e può essere anche espresso in termini percentuali; valori medi di DF compresi tra il 3% e il 5% possono ritenersi soddisfacenti.

Le simulazioni illuminotecniche sono state svolte in quattro diversi giorni dell'anno (21 gennaio, 21 aprile, 21 luglio, 21 ottobre), così da studiare la disponibilità di luce naturale al variare del percorso solare. In tutti i casi, le analisi sono state eseguite considerando condizioni di cielo parzialmente nuvoloso. A titolo di esempio si riportano in Fig. 10 i risultati per il mese di gennaio e di luglio, espressi in forma di mappa del fattore di luce diurna, con riferimento a un piano orizzontale fissato a un'altezza di 75 cm da terra. In figura

comfort requirements for office activities would call for at least 300 lux. Then, in order to improve the distribution of daylight on the working plane, two skylights were created on in the roof of the simulation model: their surface area is 2 m² each, and their tilt is 45°. The skylights are oriented to the South and are placed in line with the side glazed doors, as in Fig. 11.

vengono indicati anche i corrispondenti valori dell'illuminamento misurato all'esterno dell'edificio (E_0). Le mappe di Fig. 10 mostrano una marcata disuniformità nella distribuzione della luce naturale sul piano di lavoro. A fronte di valori elevati di DF in corrispondenza della porta vetrata d'ingresso, compresi tra il 4% e il 7%, nel resto del locale il fattore di luce diurna è inferiore

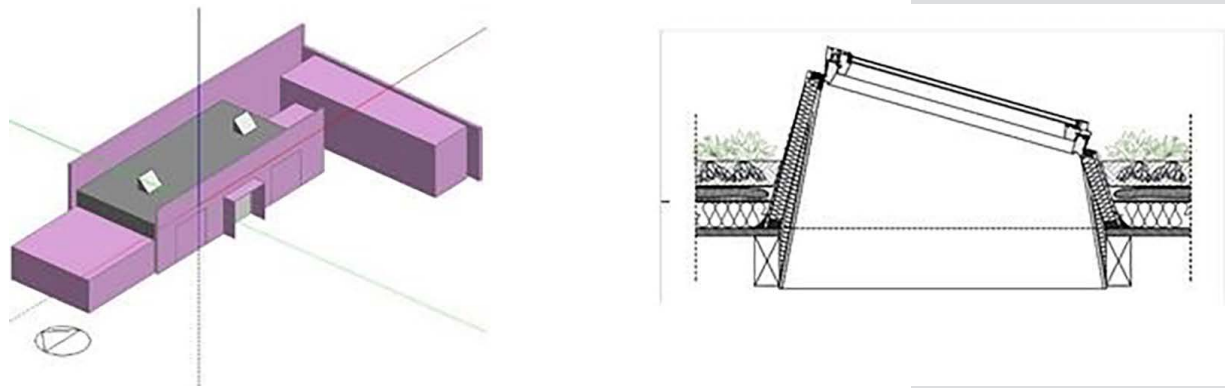


Figure 11. Left: 3D model of the building with the skylights. Right: cross section of a skylight.

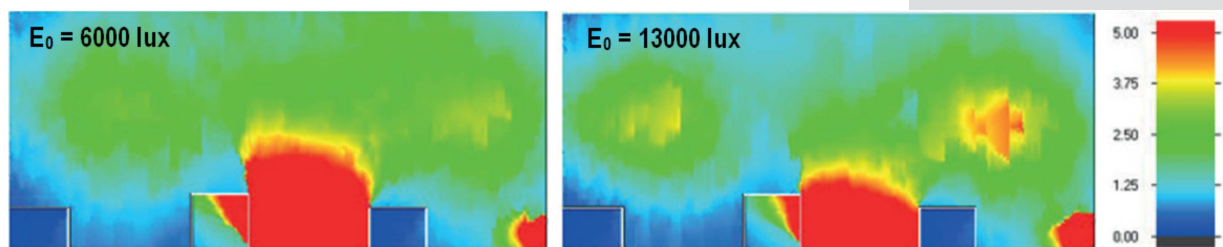


Figure 12. Daylight Factor map with the skylights (percentage values). Left: 9 a.m., January 21st. Right: 9 a.m., July 21st.

The simulations for this new configuration, whose results are reported in Fig. 12, show an improved and more uniform daylight distribution. Now, DF is between 2% and 3% on the greatest part of the working plane, with peak values above 5% close to the entrance door. By multiplying these values by the simultaneous outdoor illuminance values, the indoor daylight illuminance is above 150 lux in January and 300 lux in July, respectively; only the peripheral areas are still under-illuminated.

5. CONCLUSIONS

This study assessed the performance of green envelope systems for the renovation of an existing building in Mediterranean climate. The parameters determined by dynamic simulations are the air temperature, the internal surface temperature of the wall shaded by the green façade and the energy consumption for summer cooling. Among the proposed scenarios, those with the green façade show better energy performance. In fact, a reduction

all'1%, testimoniando un'insufficiente fruizione della luce naturale. Tenendo conto dei contestuali valori di E_0 ed applicando la precedente definizione di DF, si avrebbe infatti in buona parte del locale un illuminamento inferiore a 60 lux a gennaio e a 130 lux a luglio, quando invece per le attività d'ufficio è richiesto un illuminamento non inferiore ai 300 lux.

Al fine di migliorare la distribuzione della luce naturale e di garantire un illuminamento naturale idoneo sul piano di lavoro, si è quindi ipotizzata l'apertura di due lucernari in corrispondenza del tetto verde, con superficie di 2 m² ciascuno e inclinazione di 45° in direzione sud. Tali lucernari sono posti in asse rispetto alle vetrate schermate dal rampicante, come in Fig. 11.

Le nuove simulazioni illuminotecniche, i cui risultati sono riportati in Fig. 12, mostrano ora una distribuzione dell'illuminamento molto più uniforme. In buona parte del locale il DF si attesta tra il 2% e il 3%, con picchi ampiamente superiori al 5% in corrispondenza della porta vetrata d'ingresso. Tenendo conto dei contestuali valori di E_0 , si avrebbe nella quasi totalità del locale un illuminamento non inferiore a 150 lux a gennaio e a 300 lux a luglio; solo le aree periferiche rimangono poco illuminate.

of 1.7 °C, 1.3 °C and about 32% was obtained compared to the traditional envelope in the air temperature, internal surface temperature and thermal load, respectively. However, despite these advantages, the study has highlighted a worsening of the indoor illuminance due to daylight. To solve this drawback, it was necessary to create two skylights in order to guarantee visual comfort needed for office activities.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This work has been financed by the University of Catania within the project “Piano della Ricerca Dipartimentale 2016-2018” of the Department of Civil Engineering and Architecture.

7. REFERENCES

- [1] Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A. and Sciuto, G., Energy performance and environmental and economic assessment of the platform frame system with compressed straw, «Energy and Buildings», 166 (2018), p. 83–92.
- [2] Semprini, G., Marinosci, C., Ferrante, A., Predari, G., Mochi, G., Garai, M. and Gulli, R., Energy management in public institutional and educational buildings: The case of the school of engineering and architecture in Bologna, «Energy and Buildings», 126 (2016), p. 365–374.
- [3] Olivieri, F., Grifoni, R.C., Redondas, D., Sánchez-Reséndiz, J.A. and Tascini, S., An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall, «Energy and Buildings», 150 (2017), p. 132–148.
- [4] Vox, G., Blanco, I. and Schettini, E., Green façades to control wall surface temperature in buildings, «Building and Environment», 129 (2018), n. November 2017, p. 154–166.
- [5] Manso, M. and Castro-Gomes, J., Green wall systems: A review of their characteristics, «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 41 (2015), p. 863–871.
- [6] Pérez, G., Coma, J., Martorell, I. and Cabeza, L.F., Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review, «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 39 (2014), p. 139–165.
- [7] Castiglia Feitosa, R. and Wilkinson, S.J., Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit, «Building and Environment», 140 (2018), n. March, p. 11–22.
- [8] Yang, F., Yuan, F., Qian, F., Zhuang, Z. and Yao, J., Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai, «Sustainable Cities and Society», 39 (2018), n. November 2017, p. 43–51.
- [9] Perini, K., Bazzocchi, F., Croci, L., Magliocco, A. and Cattaneo, E., The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate, «Energy and Buildings», 143 (2017), p. 35–42.

5. CONCLUSIONI

Il presente studio ha valutato le prestazioni di sistemi di involucro verde nella ristrutturazione di un edificio esistente in clima Mediterraneo. I parametri determinati tramite simulazioni dinamiche sono la temperatura dell'aria, la temperatura superficiale interna della parete ombreggiata dalla facciata verde e il fabbisogno di raffrescamento estivo. Tra gli scenari proposti, quelli che prevedono la realizzazione di una green façade evidenziano prestazioni energetiche migliori. Infatti, rispetto all'involucro tradizionale, si ottiene una riduzione di 1.7 °C della temperatura dell'aria, di 1.3 °C della temperatura superficiale interna e di circa il 32% del carico termico. A fronte di questi vantaggi si riscontra però un peggioramento delle condizioni di illuminamento interno, per ovviare al quale si è reso necessario prevedere la realizzazione di due lucernari in copertura al fine di garantire le condizioni di comfort visivo necessarie per le attività da svolgersi.

6. RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato finanziato dall'Università di Catania nell'ambito del progetto “Piano della Ricerca Dipartimentale 2016-2018” del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura.