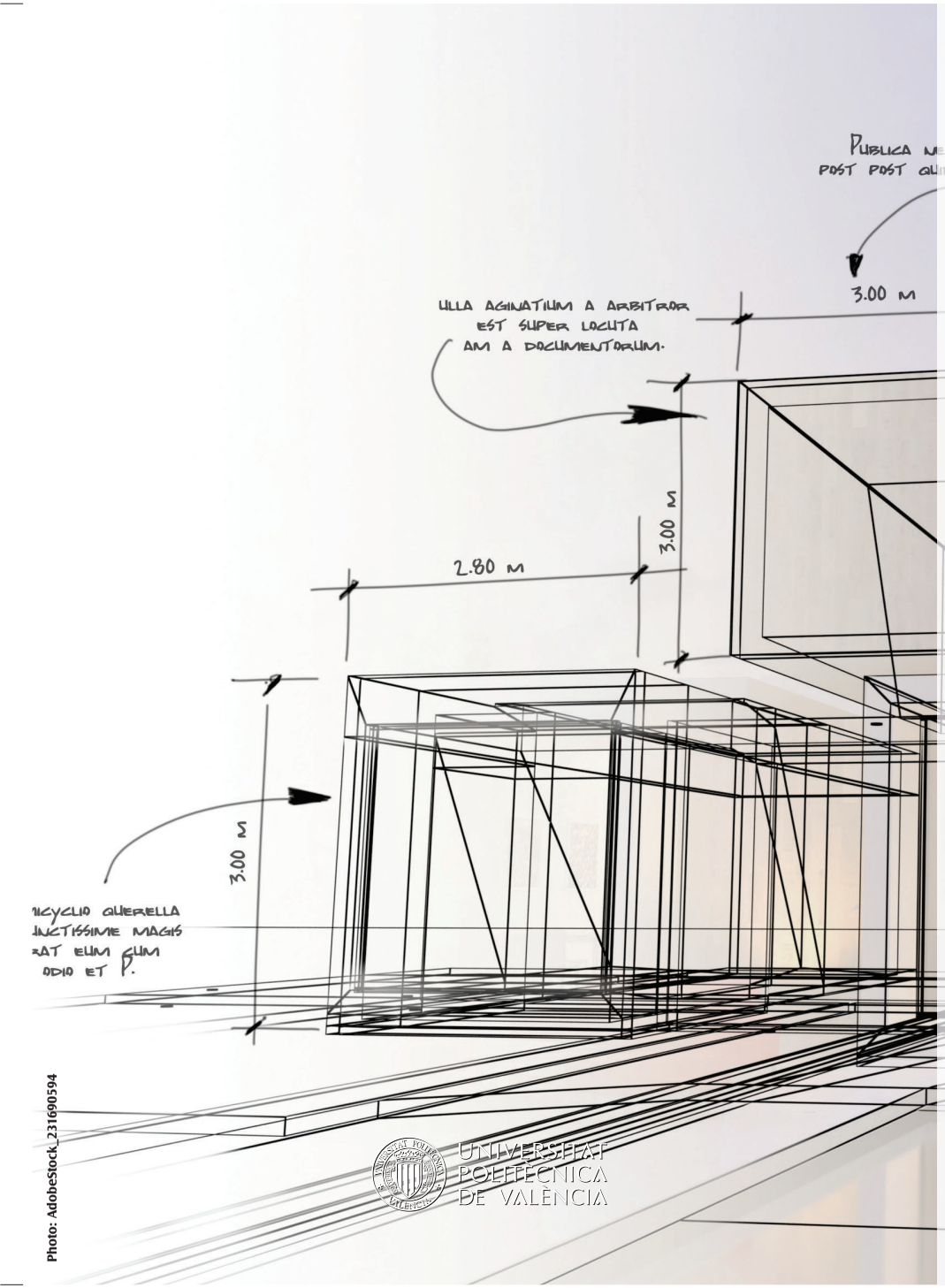

Photo: AdobeStock_231690594

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

EXCO'20

RESEARCH in BUILDING ENGINEERING

INVESTIGANDO en INGENIERÍA de EDIFICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

INVESTIGANDO en INGENIERÍA de EDIFICACIÓN

RESEARCH in BUILDING ENGINEERING

EXCO'20

ENIM URBES QUAM VETERES QUARUM
EIS MULTIS URBES ASSYRIA ET.

RESEARCH in BUILDING ENGINEERING EXCO'20

INVESTIGANDO

en INGENIERÍA de EDIFICACIÓN EXCO'20

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ETS de INGENIERÍA de EDIFICACIÓN

EDITORS Editores

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón — Universitat Politècnica de València
MEDINA RAMÓN, Francisco Javier — Universitat Politècnica de València

PUBLISHING office Editoral:

Reproexpres Ediciones

MAKING Maquetación:

ALBIOL IBÁÑEZ, José Ramón — Universitat Politècnica de València
J. Javier Martínez Benlloch

ISBN: 978-84-120732-8-7
DL: V-3145-2020

ACKNOWLEDGMENTS Agradecimientos:

©2020, ETS de Ingeniería de Edificación, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

METODO MULTICRITERIALE PER IL MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DELLE MURATURE STORICHE

MULTI-CRITERIA METHOD AIMED AT IMPROVEMENT OF HISTORICAL MASONRY ENERGY EFFICIENCY

Marianna Rotilio
Assegnista di ricerca nel Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura ed Ambientale; Università degli Studi di L'Aquila; via G. Gronchi n. 18, 67100 L'Aquila, Italia. Professore a contratto, Dottore di ricerca in Ingegneria Edile-Architettura UE presso Università degli Studi di Pavia, Ingegnere in Edile-Architettura presso Università degli Studi di L'Aquila. E-mail: marianna.rotilio@univaq.it
Research fellow in the Civil, Construction-Architectural and Environmental Engineering Department; University of L'Aquila; via G. Gronchi n. 18, 67100 L'Aquila, Italy. Adjunct Professor, PhD in Construction-Architectural Engineering at the University of Pavia, Engineer in Building Architecture at the University of L'Aquila. E-mail: marianna.rotilio@univaq.it

Pierluigi De Berardinis
Professore Ordinario in Architettura Tecnica nel Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura ed Ambientale; Università degli Studi di L'Aquila; via G. Gronchi n. 18, 67100 L'Aquila, Italia. Prorettore Vicario dell'Università degli Studi dell'Aquila, Ingegnere Civile Edile presso l'Università degli Studi di Roma La Sapienza. E-mail: pierluigi.deberardinis@univaq.it
Full Professor in Technical Architecture in the Civil, Construction-Architectural and Environmental Engineering Department; University of L'Aquila; via G. Gronchi n. 18, 67100 L'Aquila, Italy. Deputy Chancellor of the University of L'Aquila, Civil Engineer at the University of Rome La Sapienza. E-mail: pierluigi.deberardinis@univaq.it

Luis Palmero Iglesias
Profesor Titular de Universidad por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Doctor por la Universitat Politècnica de València, Doctor mención internacional por la Facoltà di Architettura di Firenze, Ingeniero de Edificación por la Universidad Castilla La Mancha, Licenciado en Bellas Artes por la Universitat Politècnica de València, Especialista en Patología Edificación, Departamento de Construcciones arquitectónicas. E-mail: lpalmero@csa.upv.es
Professor in the Superior Technical Architecture School; University of Valencia,Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. PhD in the University of Valencia, PhD International in the Florence Architecture Faculty, Engineer at the University Castilla La Mancha,Graduate in the Arts at the University of Valencia,Specialist in Building pathology, Architecture Construction Department. E-mail: lpalmero@csa.upv.es

Abstract

The latest regulatory update at EU level on energy matters is the Directive 2018/844/EU that introduced an important novelty about the fact that "[redacted] ... *The research and testing of new solutions capable of improving the energy performance of buildings and historical sites have to be encouraged, ensuring at the same time the cultural heritage protection and conservation*." At European level, there are finally signs of awareness of the importance of buildings and historical contexts. But the study of the state of the art has shown the lack of methodological references and best practices related this matter. For this reason, a question to be answered concerns the search for compatible intervention methods, techniques and strategies to implement the historical buildings energy efficiency. Therefore, this paper will illustrate a research methodology aimed at searching for compatible intervention methods, techniques and strategies to gain this purpose. This method is based on several phases to evauate different efficiency strategies based on the transformability level of the walls in order to identify the ones which could be compatible with the values and, at the same time, energy efficient. The results consist on a matrix that is able to guide the design choices according to certain criteria. The described methodology was then applied to an aggregate located in the historical centre of Fontecchio (Aq), a municipality of the Abruzzo inland.

Keywords

Energy efficiency, insulating materials, historic masonry, matrix

Introduzione

L'ultimo aggiornamento normativo a livello comunitario in materia energetica è costituito dalla Direttiva 2018/844/UE che modifica la Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD) e la 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Tale aggiornamento è stato necessario per conseguire l'obiettivo che gli Stati Membri si sono posti, ovvero ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40% entro il 2030 rispetto al 1990, da conseguire con l'aumento del consumo di energia da fonti rinnovabili e attraverso un ulteriore incremento dell'efficienza energetica, operando in particolare sulla decarbonizzazione del parco immobiliare, responsabile di circa il 36% di tutte le emissioni di CO2 nell'UE (Costanzo E 2018). In termini di efficienza energetica, essa appare in linea anche con i Sustainable Development Goals (SDGs) dell'Agenda 2030 che dedicano un intero topic (SDG7) a tale tema. Una importante novità introdotta dalla Direttiva è presente nelle considerazioni iniziali, punto 9, dove si legge che "omissis … *È opportuno promuovere la ricerca e la sperimentazione di nuove soluzioni in grado di migliorare la prestazione energetica degli edifici e dei siti storici, garantendo allo stesso tempo la protezione e la conservazione del patrimonio culturale*.". Finalmente a livello europeo appaiono sentori della presa di coscienza dell'importanza degli edifici e dei contesti storici non vincolati come i beni monumentali ma che per valori storici, architettonici, tecnico-costruttivi, ambientali si ha il dovere di proteggere e conservare. Gli Stati Membri dovranno recepire la direttiva entro il 10 marzo 2020 mettendo in gioco proposte concrete ed attuabili. Solo nel contesto Italiano, circa il 65% degli edifici è stato costruito precedentemente alla prima legge che introduceva criteri per il risparmio energetico (L. 373.1976). Inoltre secondo (Marchesini E 2018) il 28% dell'energia primaria viene consumato per il riscaldamento e il raffreddamento delle case. Secondo dati Istat (Rapporto Istat 2014) sull'intero stock degli edifici abitati storici, quasi due su dieci sono stati costruiti prima del 1919, dunque in valori assoluti, si contano più di 2,1 milioni di edifici storici abitati.

Dunque è evidente la necessità di intraprendere azioni volte a migliorare l'efficienza energetica degli edifici esistenti storici. Molti sono stati gli autori che hanno eseguito delle analisi e ricerche in tal senso (D'Amico A 2019, Balabam O 2017, Braulio-Gonzalo M 2017) ma nella maggior parte dei casi non si riferiscono a contesti esistenti eportatori di valori storici, architettonici, tecnico-costruttivi che devono essere rispettati e che comportano l'adozione di scelte rispettose del contesto. Oppure gli studi analizzati non sono inquadrati all'interno di ricerche strutturate in grado di avere un peso nella definizione delle scelte politiche dei Paesi nei quali essi sono stati condotti. Per questo motivo un interrogativo al quale è necessario rispondere riguarda la ricerca delle modalità, tecniche e strategie di intervento compatibili per implementare l'efficienza energetica degli edifici storici. Nel presente articolo si illustrerà dunque una metodologia di ricerca per conseguire tale finalità in relazione all'involucro edilizio storico. Tale metodologia è stata verificata mediante l'applicazione su un caso di studio ovvero un edificio storico sito in Italia, in un centro minore in Provincia di L'Aquila, chiamato Fontecchio.

Metodologia

La metodologia elaborata parte dalle conoscenze acquisite durante lo sviluppo di una ricerca precedente alla quale si rimanda integralmente (Rotilio M 2018), ottenute mediante l'esecuzione del rilievo geometrico, strutturale e materico, dell'analisi storica, dell'individuazione delle principali fasi di accrescimento e delle relative epoche di trasformazione. La citata ricerca proseguiva poi mediante l'elaborazione di indagini sperimentali volte a determinare la trasmittanza termica delle murature mediante l'applicazione della UNI ISO 9869:1994. Veniva infatti impiegata una tecnica di indagine non distruttiva, the heat flow-meter measurement (HFM), che consente di determinare la citata trasmittanza mediante misurazioni eseguite direttamente in situ. Conclusa la fase conoscitiva dell'edificio storico di cui al citato articolo (Rotilio M 2018), lo studio è proseguito mediante la realizzazione di una serie di fasi. La prima è consistita nello sviluppo della modellazione dell'edificio mediante il software Design Builder che si basa su sistemi di simulazione dinamica. E' proseguita poi attraverso la ricerca dei materiali isolanti più diffusi in commercio da usarsi come coibenti delle pareti esterne, studiando sia quelli naturali che quelli sintetici.

Introduction

The latest regulatory update at EU level on energy matters is the Directive 2018/844/EU which amends the Directive 2010/31/EU on the buildings energy performance (EPBD) and the 2012/27/EU one on energy efficiency. This update was necessary to achieve the objective that the Member States have set themselves, that is the reduction of greenhouse gas emissions by at least 40% by 2030 compared to 1990 figures. It has to be achieved with the increase in energy consumption by renewable sources and through a further energy efficiency enhancement, operating particularly on the decarbonisation of the built environment, which is responsible for approximately 36% of all CO2 emissions in the EU (Costanzo E 2018). In terms of energy efficiency, it also appears in keeping with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, which dedicate a whole topic (SDG7) to this theme. An important novelty introduced by the Directive is mentioned in the initial considerations, point 9, where it says that "[redacted] ... *The research and testing of new solutions capable of improving the energy performance of buildings and historical sites have to be encouraged, ensuring at the same time the cultural heritage protection and conservation*." At European level, there are finally signs of awareness of the importance of buildings and historical contexts which altough are not safeguarded as monumental heritage, they deserved to be protected and preserved for historical, architectural, technical-constructive and environmental values. Member States will have to transpose the directive by 10 March 2020 by putting concrete and feasible proposals into play. In the Italian context only, about 65% of the buildings were built before the first law which introduced criteria for energy saving (L.373.1976). Furthermore, according to (Marchesini E 2018), 28% of primary energy is consumed for heating and cooling buildings. According to Istat data (Rapporto Istat 2014) on the entire stock of historical inhabited constructions, almost two out of ten were built before 1919; therefore, in absolute values, there are more than 2.1 million historic inhabited buildings.

So, there is a clear need to take actions aimed at improving the energy efficiency of existing historic buildings. Many authors have carried out this kind of analysis and researches (D'Amico A 2019, Balabam O 2017, Braulio-Gonzalo M 2017) but in most of the cases they do not refer to existing contexts, that are bearers of historical, architectural, technical-constructive values, which have to be respected and which involve the adoption of choices, that are respectful of the context. At the same time, some analyzed studies are not framed within structured researches capable of carrying weight in defining the political choices of the countries in which they were conducted. For this reason, a question to be answered concerns the search for compatible intervention methods, techniques and strategies to implement the historical buildings energy efficiency. Therefore, this paper will illustrate a research methodology aimed at achieving this purpose in relation to the historical building envelope. This method was verified thanks to the application in a case study, that is a historical building located in Italy, in a small rural village in the Province of L'Aquila, named Fontecchio.

Methodology

The drawn-up methodology starts from the knowledge acquired during the development of a previous research to which we fully refer (Rotilio M 2018), obtained by carrying out the geometric, structural and material survey, the historical analysis, the identification of the main growth phases and the related transformation periods. Thus, the aforementioned research continued through the experimental investigations development aimed at determining the thermal transmittance of the walls by applying UNI ISO 9869: 1994. Indeed, a non-destructive investigation technique was used, that is known as heat flow-meter measurement (HFM), which allows to determine the transmittance by means of measurements performed directly in situ.

Once the cognitive phase of the historical building provided for in the aforementioned article (Rotilio M 2018) was completed, the study continued by carrying out a series of phases. The first one consisted in the implementation of the model of the building using the Design Builder software, which is based on dynamic simulation systems.

In merito ai primi sono stati indagati quelli di origine animale, vegetale e minerale, in riferimento al secondo gruppo sono stati analizzati anche gli isolanti di origine composita.

La ricerca è proseguita poi valutando differenti strategie di efficientamento in funzione del livello di trasformabilità delle pareti al fine di individuare quelle compatibili con i valori, ma allo stesso tempo efficienti dal punto di vista energetico. In merito al giudizio di trasformabilità delle murature, esso è stato definito come "alto" in corrispondenza di facciate prive di elementi di interesse storico-artistico da salvaguardare (assenza di imbotti, portali, marcapiani, lesene, ...), con finiture superficiali di scarso interesse (intonaci premiscelati o intonaci privi di finiture pregiate,...); "medio" in presenza di murature con elementi di interesse storico-artistico da salvaguardare (imbotti, portali,...) posti in rilievo rispetto alla finitura della facciata stessa (finitura non di pregio) oppure conformati in modo tale da consentire l'applicazione di materiali isolanti con spessori ridotti (ad esempio fregi o decorazioni in bassorilievo); "basso" nei casi di pareti che presentano elementi di interesse storico-artistico da salvaguardare (imbotti, portali,...) e finiture superficiali di pregio (stucchi,...), oppure nel caso di tipologie murarie storiche a faccia vista.

In seguito sono state svolte le simulazioni dinamiche per ciascun isolante scelto applicando i singoli materiali isolanti analizzati in ognuna delle strategie di intervento ipotizzate e sono stati definiti i costi di fornitura e posa in opera dell'isolante. Eseguite le simulazioni, sono stati raccolti tutti i dati ottenuti e, in particolare, organizzati in forma matriciale secondo il grado di trasformabilità, nelle righe, e le seguenti variabili, nelle colonne (De Berardinis 2014, Annibaldi V 2020):

- tipo di isolante;
- trasmittanza;
- fabbisogno di riscaldamento;
- riduzione del fabbisogno di riscaldamento;
- costo.

Sono state poi aggiunte ulteriori due colonne nelle quali è stato riportato il punteggio inerente la riduzione del fabbisogno di riscaldamento rispetto allo stato di fatto e quello inerente il costo di fornitura e posa in opera dell'isolante, secondo una scala di valore da 1 a 4. Alla luce dei punteggi riportati in queste ultime due colonne della matrice è stato scelto l'isolante da applicare alla muratura ed è stato redatto il progetto esecutivo. La metodologia descritta è stata poi applicata ad un aggregato sito nel centro storico di Fontecchio (Aq), comune appartenente all'entroterra abruzzese in Italia.

Caso di studio e risultati

Il fabbricato oggetto di studio appartiene al tessuto storico del centro di Fontecchio ed è posto ai margini di quest'ultimo. Faceva parte delle cosiddette case-muro che costituivano la cinta difensiva medievale ed è costituito da quattro livelli fuori. Presenta muri perimetrali di spessore variabile, di dimensioni comprese tra 80 e 120 cm al piano terra che si restringono nei piani superiori fino ad assumere dimensioni pari a 55 cm. La muratura dell'edificio è costituita da conci di pietra parzialmente squadrati di piccole e medie dimensioni e scaglie di pietra con superficie interna ed esterna intonacata. I cantonali sono realizzati con conci squadrati di grandi dimensioni, mentre in corrispondenza degli infissi sono presenti stipiti in pietra monopezzo. L'ultimo piano dell'abitazione faceva originariamente parte di *Palazzo Muzi*. Alle murature presenti sono stati attribuiti due differenti livelli di trasformabilità: "alta" in corrispondenza di una unica parete intonacata priva di cornici o di elementi di valore; "media" per le altre pareti in quanto dotate di cornici e portali (Fig. 1).

Nota la trasmittanza termica (Rotilio M 2018) pari a 1.98 W/m^2 K, mediante la costruzione del modello energetico con Design Builder (Fig. 2) è stato possibile analizzare le condizioni energetiche pre-intervento (Fig. 3), ricavando in particolare il fabbisogno di riscaldamento pari a 133.36 kWh/m^2.

La valutazione delle strategie progettuali di efficientamento energetico è partita dal giudizio di trasformabilità, al fine di individuare un ventaglio di soluzioni compatibili con i valori storici, architettonici, tecnico-costruttivi.

Immagine 1. Elementi di valore da conservare nell'edificio oggetto di studio
Image 1. Valuable items to be preserved in the building that is object of study

Then, it continued through the search for the most common insulating materials distributed commercially to be used as external walls insulation, studying both natural and synthetic ones. With regard to the natural ones, those of animal, vegetable and mineral origin were investigated, while with reference to the second group, insulators of composite origin were also analyzed. The research went on by evaluating different efficiency strategies based on the transformability level of the walls in order to identify the ones which could be compatible with the values and, at the same time, energy efficient. Regarding the transformability assessment of the walls, it has been defined as "high" in correspondence with facades without elements of historical and artistic interest to be safeguarded (absence of arch or vault intradoses, portals, string courses, pilaster strips,...) with minor interest surface finishes (premixed plasters or plasters without precious finishes,...); "medium" in the presence of masonry with elements of historical-artistic interest to be safeguarded (arch or vault intradoses, portals,...), which are more prominent than the facade (not valuable finish) or shaped in a way as to allow the application of insulating materials with reduced thickness (for instance, friezes or bas-relief decorations); "low" in the cases of walls that exhibit elements of historical and artistic interest to be safeguarded (arch or vault intradoses, portals,...) and high quality surface finishes (stuccoes,...), or in the case of historical types like the exposed stone walls.

The dynamic simulations were subsequently carried out for each chosen insulation by applying the individual insulation materials in each of the suggested intervention strategies. In the meantime, the costs linked to the supply and the installation of the insulation were defined. Once the simulations were performed, all the data obtained were collected and, particularly, they were organized in matrix form with the level of transformability in the rows and the following variables, in the columns (De Berardinis 2014, Annibaldi V 2020):

- insulation type;
- thermal transmittance;
- heating requirement;
- reduction of heating needs;
- cost.

Two further columns were added, in which the score regarding the reduction of the heating requirement compared to the actual state and the one concerning the cost of supply and installation of the insulation were reported, according to a value scale from 1 to 4. In light of the scores reported in these last two columns of the matrix, the insulation to be applied to the masonry was chosen and the executive project was drawn up. The described methodology was then applied to an aggregate located in the historical centre of Fontecchio (Aq), an Italian municipality of the Abruzzo inland.

Case study and results

The building under study belongs to the historical heritage of the municipality of Fontecchio and it is located on the edge of this area. It was part of the so-called wall-houses that constituted the medieval defensive wall and consists of four floors above ground. It has outer walls of variable thickness, ranging in size from 80 to 120 cm on the ground floor, which shrink to the upper floors until they reach a size of approximately 55 cm.

Immagine 2. Viste dell'aggregato oggetto di studio. Modellazione tridimensionale realizzata con il software Design Builder
Image 2. Views of the aggregate under study. Three-dimensional model made with the Design Builder software

Infatti, la presenza di cornici e portali ha determinato la necessità di limitare lo spessore dell'isolante da posizionare nella parte esterna della muratura; analogo discorso anche per quanto riguarda l'interno infatti l'edificio storico è caratterizzato da stanze di dimensioni limitate. Per questo motivo sono state valutate ventiquattro differenti combinazioni di isolamento interno ed esterno eseguendo per ciascuna di esse l'analisi dei costi dell'intervento, inerentemente le sole voci di fornitura e posa in opera dell'isolante, e la simulazione dinamica energetica. Per eseguire quest'ultima, gli spessori da attribuire ai materiali isolanti sono stati calcolati in modo tale da ottenere una trasmittanza complessiva della chiusura verticale post-intervento immediatamente inferiore o al massimo uguale al limite imposto dalla normativa.

Eseguite le simulazioni, sono stati raccolti tutti i dati ottenuti nella matrice descritta nel paragrafo precedente (Fig 4). Come si evince da tale matrice, nel caso di parete ad alta trasformabilità, le soluzioni migliori, sia in termini di riduzione del fabbisogno di riscaldamento che di costo, sono quelle che prevedono l'impiego di fibra di lino, PET e lana di roccia. Data l'assenza di particolari valori, è stata adottata quest'ultima soluzione. Nel caso invece di parete a media trasformabilità, le soluzioni con il punteggio più elevato sono risultate quelle che impiegavano EPS e polistirene espanso sinterizzato, con spessori pari rispettivamente a 6 cm e 8 cm. Tuttavia questi ultimi non risultano compatibili con i valori presenti nell'aggregato storico pertanto le relative soluzioni progettuali sono state eliminate.

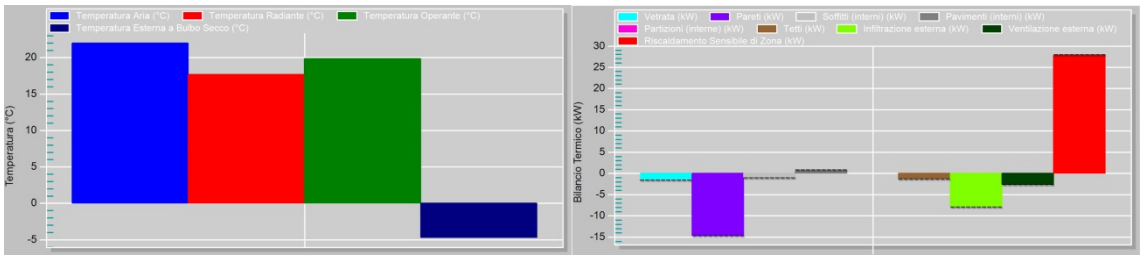

Immagine 3. Alcuni dei principali risultati di calcolo in condizione pre-intervento. A sinistra analisi delle temperatura, a destra bilancio termico
Image 3. Some of the main calculation results in pre-intervention condition. On the left the temperature analysis and on the right the thermal balance

The masonry of the building consists of partially squared small and medium-sized stone ashlars and stone flakes with internal and external plastered surface. The building quoins are realized with large square blocks, while one-piece stone jambs are located near the window frames. The top floor of the house was originally part of Palazzo Muzi. Two different levels of transformability have been attributed to the walls of this case study: "high" in correspondence with a single plastered wall without frames or valuable elements; "medium" for the other walls because they are equipped with frames and portals (Fig. 1).

Once the thermal transmittance (Rotilio M 2018) equal to 1.98 W/m2K was identified, thanks to the energy model implemented on Design Builder (Fig. 2), it was possible to analyze the pre-intervention energy conditions (Fig. 3), obtaining also the heating requirement, that is equal to 133.36 kWh/m^2.

The evaluation of the energy efficiency design strategies started from the transformability assessment, in order to identify a range of solutions which may result compatible with historical, architectural, technical-constructive values. In fact, frames and portals have determined the need to limit the thickness of the insulation to be placed on the external part of the masonry; likewise, there are some limits in the internal part, where the historical building is characterized by rooms of small dimensions. For this reason, twenty-four different combinations of internal and external insulation were evaluated by performing for each of them the costs analysis of the intervention, linked to the supply and the installation of the insulation and the dynamic energy simulation. Regarding the execution of the latter, the thicknesses to be attributed to the insulating materials were calculated in such a way as to obtain an overall thermal transmittance of the post-intervention vertical closure. Consequently, it has to result immediately lower or at most equal to the limit imposed by the legislation.

Once the simulations were performed, all the data obtained in the matrix described in the previous paragraph were collected (Fig 4). As can be seen from this matrix, in the case of a highly transformable wall, the best solutions, both in terms of reducing heating needs and costs, are those that require the use of flax fiber, PET and rock wool. The last one solution was adopted, given the lack of particular values.

In the case of a medium transformable wall, the solutions with the highest score were those that used EPS and sintered expanded polystyrene, with thicknesses of 6 cm and 8 cm respectively. Nevertheless, these ones are not compatible with the values that it is possible to detect in the historical aggregate. Therefore, the related design solutions were eliminated. Among the low thickness insulators, the best score one was selected, that is the thermo-plaster with weber therm-xlight 042.

Conclusions

- This paper is part of the line of studies that researches methodologies and best practices to analyse and improve the energy efficiency of the building envelope, also with a view to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) in the 2030 agenda, with particular reference to target n. 7 and the transposition of Directive 2018/844/EU.
- It illustrates a methodology based on experimental and non-experimental cognitive investigations, that as a general rule were performed directly in situ and on the study of the main types of insulating materials commercially available. The aim of this methodology is to define an operational tool which, in compliance with the historical, architectural, technical-constructive values, may guide the design choices in terms of reducing costs and energy requirements for winter heating. This operational tool materializes in a multi-criteria matrix. As well as this, the methodology was applied in a case study, which consists of a historical aggregate located in the historical centre of Fontecchio (Italy).
- The study presented is part of a wider research aimed at deepening the theme of the energy behaviour and improvement of historical walls in reference to the particular context of the so-called "area of the L'Aquila limestone".

	INSULATION TYPE	Thickness (cm)	Thermal transmittance (W/m2 K)	Heating requirement (kWh/m2)	Reduction of heating needs (%)	Cost (Eur)	Score related to the reduction of the heating requirement [1;4]	Score related to the cost [1;4]
HIGH Transformability	Flax fiber	10	0.328	60.83	54.39	18.82	4	3
	Common reed	14	0.304	63.98	53.27	33.60	3	1.5
	Coconut fiber	10	0.348	60.52	54.62	32.50	4	1.5
	Wood fiber	10	0.361	64.95	51.30	28.32	1	2
	Mineralized wood wool	12	0.287	68.78	48.43	25.00	1	2
	Canvas fiber	10	0.342	62.32	52.03	29.27	2	2
	Cork	10	0.322	63.11	52.68	52.00	3	0.5
	Cellulose fiber	10	0.318	62.97	52.79	32.00	3	1.5
	Straw	10	0.361	64.81	51.41	29.50	1	2
	Sheep wool	10	0.322	60.90	52.65	34.30	3	1
	Rock wool	**10**	**0.315**	**62.51**	**53.13**	**14.47**	**3**	**4**
	Expeanded perlite	10	0.393	66.23	50.44	26.50	1	2
	Natural pozzolanic pumice	22	0.364	64.90	51.34	38.60	1	1
	Calcium silicate	10	0.361	64.85	51.38	40.10	1	1
	Polystyrene fiber	12	0.361	64.82	51.40	30.60	1	1.5
	Recycled rubber SBR and bituminous paper	10	0.280	61.36	53.99	49.80	4	1
	Polyster from urban harvest (PET)	10	0.287	61.58	53.83	16.95	4	3
MEDIUM Transformability	Kenaf	8	0.287	61.60	53.81	28.00	4	2
	EPS	6	0,3075	62.68	53.00	14.92	4	4
	Aerogel	2	0.361	64.82	51.40	86.00	1	0.5
	PCM capsules	4	0.361	64.82	51.40	86.10	1	0.5
	Sintered expanded polystyrene	8	0.353	61.98	53.53	10.24	4	4
	Thermic plaster - weber therm xlight 042	**3**	**0.831**	**82.33**	**28.26**	**21.00**	**0.5**	**3**
	Thermic plaster - diathonite evolution	3	1.216	97.08	27.21	45.00	0.5	1

Immagine 4. Matrice di valutazione
Image 4. Evaluation matrix

Tra gli isolanti a ridotto spessori è stato selezionato quello con il punteggio migliore ovvero il termointonaco con weber therm-xlight 042.

Conclusioni

- Il presente articolo si inserisce nel filone di studi che ricerca metodologie e best practices per analizzare e migliorare l'efficienza energetica dell'involucro edilizio, anche nell'ottica del conseguimento dei Sustainable Development Goals (SDGs) in the 2030 agenda, in riferimento in particolare al target n. 7 e del recepimento della Direttiva 2018/844/UE.
- Esso illustra una metodologia basata su indagini conoscitive sperimentali e non, eseguite direttamente in situ e sullo studio delle principali tipologie di materiali isolanti presenti in commercio. La principale finalità di tale metodologia consiste nella definizione di uno strumento operativo che, nel rispetto dei valori storici, architettonici, tecnico-costruttivi presenti, possa guidare le scelte progettuali in termini di riduzione di costi e di fabbisogno energetico di riscaldamento invernale. Tale strumento operativo si concretizza in una matrice multicriteriale. La metodologia è stata poi applicata in un caso di studio costituito da un aggregato storico sito nel centro storico di Fontecchio (Italia).
- Lo studio presentato è parte di una ricerca più ampia volta ad approfondire il tema del comportamento e miglioramento energetico delle murature storiche in riferimento al particolare contesto della cosiddetta "area del calcare aquilano".

NOTE / NOTES

M.R. ha scritto l'articolo ed ha sviluppato la ricerca, P.D.B. è il responsabile scientifico della ricerca ed insieme a L.P.I. ha supervisionato il testo. M.R. wrote this paper and developed the research, P.D.B. was the responsible for the scientific research and oversaw the text with L.P.I.

BIBLIOGRAFIA / BIBLIOGRAPHY

- Annibaldi V, Cucchiella F, De Berardinis P, Gastaldi M, Rotilio M, «An integrated sustainable and profitable approach of energy efficiency in heritage buildings» *Journal of Cleaner Production* 251 (2020), 119516

- Balaban O, Puppim de Oliveira JA, «Sustainable buildings for healthier cities: assessing the co-benefits of green buildings in Japan.» *Journal of Cleaner Production* 163 (2017) 568-578.
- Braulio-Gonzalo M, Bovea M.D, «Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: thickness optimisation. » *Energy and Buildings* 150 (2017) 527-545.
- Costanzo E «La Direttiva Europea 2018/844 che modifica l'EPBD» In: *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2018* Eds: Amato A, Costanzo E, Di Pietra B, Hugony F, Enea (2018)
- De Berardinis P, Rotilio M, Marchionni C, Friedman A, «Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: a minor centre in the Abruzzo region. Italy» *Energy Buildings* 80 (2014) 415-423.
- D'Amico A, Ciulla G, Traverso M, Lo Brano V, Palumbo E, «Artificial Neural Networks to assess energy and environmental performance of buildings: an Italian case study.» *Journal of Cleaner Production* 239 (2019).
- Marchesini E «https://www.ilsole24ore.com/art/casa/2018-09-15/case-italiane-troppo-vecchie-ristrutturazioni-business-50-miliardi-083013.shtml?uuid=AE4JNAtF» (access: 24.01.2019)
- Rapporto Istat «Paesaggio e patrimonio culturale – Bes2014, https://www.istat.it/it/files//2014/06/09_Paesaggio-patrimonio-culturale-Bes2014.pdf» (access: 24.01.2019)
- Rotilio M, Cucchiella F, De Berardinis P, Stornelli V, «Thermal Transmittance Measurements of the Historical Masonries: Some Case Studies.» *Energies* 11 (2018), 2987.