

# Towards the cognitive building: information modeling for the energy audit

Giuseppe Martino Di Giuda, Emanuela Quaquero,  
Valentina Villa, Lavinia Chiara Tagliabue, Giuseppe Desogus\*,  
Antonello Sanna, Angelo Luigi Camillo Ciribini

## Highlights

The research focuses on the concept of cognitive building which identifies in the “digital twin” of the building the ideal interface between man and building to allow internal conditions and provided services adaptation by focusing on the user.

The base of the research is the digitization of the building that permits the gathering, transmission, filtering and analysis of extracted information in order to promote the minimization of waste, maximization of comfort and optimization of energy flows that necessarily should be flexible, adaptable and customized. The contribution aims at testing the use of the BIM methodology in order to make energy audit procedures more efficient.

## Abstract

The new paradigm of smart building requires the accomplishment of occupants needs through the analysis of data gathered within the building, which switches from activities host to provider of customized services for occupants. The digitalization supports this new approach, as the implementation of Building Management Systems (BMS) in Building Information Modelling (BIM) environment allows to link the information collected to a database. The contribution is focused on a case study of the University of Cagliari, the Mandolesi Pavilion, and it is aimed at implementing and improving energy audit procedures by the use of Building Information Modelling.

## Keywords

Energy retrofiting, Cognitive building, Energy audit procedures, BIM, BMS

## 1. INTRODUCTION

Analysing the broad definition of Industry 4.0, it is worthy to note that this is leading to “a confluence of disruptive digital technologies that are set to change the manufacturing industry in an unrecognizable way. The key elements of this change are the surprising growth in computing power, and connectivity, the emergence of advanced analysis and business intelligence functionality, new forms of human-machine interaction and the improvements in the transfer of digital instruction to the physical world, such as advanced robotics and 3-D printing “[1][2]. One element that appears with the greatest transparency is the fact that Cyber-Physical Systems (CPS) seem to be supply chain systems [3]. Industry 4.0 is based on principles of flexibility

### Giuseppe M. Di Giuda

*Dipartimento di Architettura,  
Ingegneria delle Costruzioni e  
Ambiente Costruito, Politecnico  
di Milano, via G. Ponzio 31,  
Milano, 20133*

### Emanuela Quaquero

*Dipartimento di Ingegneria  
Civile, Ambiente e Architettura,  
Università di Cagliari, via  
Marengo 2, Cagliari, 09123,  
Italia*

### Valentina Villa

*Dipartimento di Ingegneria  
Strutturale, Edile e Geotecnica,  
Politecnico di Torino, Corso  
Duca degli Abruzzi 24, Torino,  
10129*

### Lavinia C. Tagliabue

*Dipartimento di Ingegneria  
dell'Informazione, Università di  
Brescia, via Branze, 38, Brescia,  
25123*

### Giuseppe Desogus

*Dipartimento di Ingegneria  
Civile, Ambiente e Architettura,  
Università di Cagliari, via  
Marengo 2, Cagliari, 09123,  
Italia*

### Antonello Sanna

*Dipartimento di Ingegneria  
Civile, Ambiente e Architettura,  
Università di Cagliari, via  
Marengo 2, Cagliari, 09123,  
Italia*

### Angelo L. C. Ciribini

*Dipartimento di Ingegneria  
Civile, Architettura, Territorio,  
Ambiente e di Matematica,  
Università di Brescia, via Branze,  
42, Brescia, 25123, Italia*

\* Corresponding author  
Tel.: +39-0706755395;  
fax: +39-0706755818;  
e-mail: gdesogus@unica.it

of production and the individualization of products, which in real time are subject to the specific expectations of individual customers. Technologies and concepts are allowing the machines and algorithms of future societies to make decisions and carry out independently learning activities with minimal human-machine interaction [4]. These expressions introduce the paradigm of the Fourth Industrial Revolution in the Construction Sector in terms of supporting the semi-autonomy of decision-making processes.

This opens up to the concept of cognitive building which identifies in the “digital twin” of the building the ideal interface between man and building allowing conditions and provided services adaptation by focusing on the user in a specific and predictive way.

A monitoring and actuating network system permeating the building supports and derives by the ability to control conditions and enforce constraints in the indoor environment where generated and interfered flows are analysed. The crucial assumption on which the cognitive concept is based is the digitization of the building that permits the gathering, transmission, filtering and analysis of extracted information in order to promote the minimization of waste, maximization of comfort and optimization of energy flows that necessarily should be flexible, adaptable and customized. The application of advanced data analysis methods implemented through automated algorithms is conceivable by machine-readable and formerly computational data that can be collected, organized, visualized and networked within the building through a BIM system.

The implementation of the cognitive systems in the construction sectors appears really interesting: the availability of sensorized building components with “intelligence” during the manufacturing process, their installation and, above all, their useful life of service appears a very effective support in decision-making processes. In the Operations & Maintenance phase, the sensorized component would generate substantial information flows relating to its performance. In this way the original manufacturer would become a service provider: in particular, within performance-based contracts. Furthermore, the so-called Cognitive & Living Built Asset is essential since the new real estate or infrastructure product places the user at the centre of the business. The concept of cognitive building is integrated with sensing technologies, distributed intelligence and IoT. It introduces in the building new possibilities of interaction and autonomization with alternative models of management during building life cycle in order to optimize in real-time all kind of intervention. The driver of these processes can be the energy optimization from which environmental impacts and management costs

## 1. INTRODUZIONE

*Analizzando la definizione estesa di Industria 4.0 si nota come questa comporti “una confluenza di tecnologie digitali diramanti che sono impostate per cambiare il settore manifatturiero in modo irrisconoscibile. Gli elementi cardine di tale cambiamento sono la crescita sorprendente della potenza di calcolo e della connettività, l’emergere di analisi avanzate e funzionalità di business intelligence, la nascita di nuove forme di interazione uomo-macchina ed i miglioramenti nel trasferimento delle istruzioni digitali al mondo fisico, come ad esempio in robotica avanzata e la stampa 3D” [1][2]. Ciò lega indissolubilmente i Sistemi Cibernetico-Fisici (Cyber-Physical System o CPS) con la catena di fornitura [3]. L’industria 4.0 è, infatti, incentrata su principi quali la flessibilità della produzione e l’individualizzazione dei prodotti, che, in tempo reale, sono soggetti alle specifiche attese dei clienti. Le tecnologie e i concetti stanno permettendo alle macchine e agli algoritmi di società future di prendere decisioni e svolgere attività di apprendimento in autonomia, riducendo al minimo l’interazione uomo-macchina [4]. Tali espressioni potrebbero rimandare alla possibilità di introdurre il paradigma della Quarta Rivoluzione Industriale nel Settore delle Costruzioni, proprio nel senso di supportare la semi-autonomizzazione dei processi decisionali. Tutto ciò apre lo scenario al concetto di edificio cognitivo che individua nel doppio digitale un’ideale interfaccia tra l’uomo e la costruzione al fine di consentire l’adattamento delle condizioni e l’erogazione di servizi ponendo al centro l’utente in modo specifico e predittivo. La possibilità di controllare le condizioni e attuare modifiche all’ambiente confinato è supportata e derivata da una rete di monitoraggio e attuazione che permea la costruzione e i flussi che in esso e intorno ad esso si generano e interferiscono. Il presupposto su cui si basa è, dunque, evidentemente la digitalizzazione del costruito che consente la raccolta, la comunicazione, il filtro e l’analisi delle informazioni al fine di estrarre conoscenza per promuovere la minimizzazione degli sprechi, l’ottimizzazione del funzionamento rispetto alle necessità, l’organizzazione flessibile e customizzata. L’applicazione di sistemi avanzati di analisi dei dati tramite sistemi automatici è possibile con dati machine-readable e quindi computazionali che possono essere raccolti, organizzati, visualizzati e avere interazione con la costruzione tramite i sistemi informativi BIM (Building Information Modelling). I sistemi cognitivi appaiono di grande interesse nel Settore delle Costruzioni: il poter disporre di componenti edifici sensorizzati che posseggano una propria “intelligenza” nel corso della produzione manifatturiera, all’atto della loro posa in opera/installazione e, soprattutto, nel corso della loro vita utile di servizio appare un supporto efficacissimo nei processi decisionali. In particolare, nella fase di Operations & Maintenance, il componente sensorizzato genererebbe*

derive. It is important to centralize the processes of verification and control of the internal conditions, of the functioning of the energy management systems and of the flows of the occupants that define the conditioning needs (Personal Cloud or Cloud Cast of SEN-SEable City Lab at the Massachusetts Institute of Technology's) [5].

However, this workflow is valid when the cognitive building crosses all phases: from the embryonic concept to the definitive design and execution phases. For the existing building heritage, conceived according to the traditional canons, often unknown in terms of components, performance, consumption, etc., the path to the cognitive building paradigm inevitably passes through intermediate steps. A complete survey on the existing building is necessary to correctly set up all the maintenance or retrofit interventions, in order, as far as possible, to “automate” the processes. The backwardness of the construction sector in terms of knowledge process and existing asset management, makes it far away from the paradigm of Industry 4.0. One of the main areas in which these limits are clearly shown is that of improving the energy performance of the assets. The results are strongly influenced by the margins of uncertainty on the evaluation of the residual performance of the building. The necessary knowledge process, synthetically called “energy audit”, is mostly based on flows that, although regulated [6], are still conducted in an artisanal way and without strong links with the other phases of the building process. The audit is aimed at developing a calibrated physical model (baseline) which represents the energy performance of the building at the current state and allows a reliable estimation of the effects of the possible efficiency measures [7]. Actually, what is required by the regulations is still too limited quantitatively and qualitatively to be concretely used in the simulation phases [8]. If the techniques that characterize the most refined diagnostic levels, such as *simulation* [9], are implemented, the amount of information requires digital management, as well as a close correlation with the geometrical and constructive data.

The paper tests the use of Building Information Modelling methodology in order to improve the energy audit process on the building envelope. The informative model of the building capitalizes the outputs of the energy audit process and represents an efficient knowledge base for the following analysis about possible intervention scenarios. The research group is applying the cognitive paradigm to a case study of particular architectural interest: the Mandolesi Pavilion which actually hosts the laboratories of the Departments of Civil and Environmental Engineering and Architecture and Mechanical Engineering, Chemistry and Materials of the University of Cagliari. The application of digital paradigms to a case study strongly characterized

*consistenti flussi informativi relativi alle proprie prestazioni, cosicché l'originario produttore diverrebbe erogatore di servizi: in particolare, all'interno dei performance-based contract. Oltre ai componenti sensorizzati, tuttavia, è il cosiddetto Cognitive & Living Built Asset a contare, poiché il nuovo prodotto immobiliare o infrastrutturale pone l'utente al centro del business, servitizzando la produzione. Il concetto Cognitive, dunque, si integra con la sensorizzazione, l'intelligenza distribuita e l'IoT introducendo nella costruzione nuove possibilità di interazione e di autonomizzazione che introducano modelli predittivi di gestione, manutenzione e riorganizzazione nel ciclo di vita dell'edificio per l'ottimizzazione in real-time delle operazioni della costruzione. Il driver di questi processi può essere l'ottimizzazione energetica da cui derivano impatti ambientali e costi di gestione in modo tale da rendere sostanzialmente centrali i processi di verifica e controllo delle condizioni interne, del funzionamento dei sistemi di gestione dell'energia e dei flussi degli occupanti che definiscono le necessità di condizionamento (come idealmente nella Personal Cloud or Cloud Cast del SEN-SEable City Lab al Massachusetts Institute of Technology's) [5].*

*Tuttavia questo genere di flusso operativo è valido quando l'edificio cognitivo attraversa tutte le fasi da quelle embrionali di concept a quelle definitive di progettazione ed esecuzione. Per quanto riguarda il patrimonio edilizio esistente, concepito secondo i canoni tradizionali, spesso sconosciuto in termini di componenti costitutivi, performance, consumi, etc., il percorso verso il paradigma dell'edificio cognitivo attraverso inevitabilmente degli step intermedi volti ad un'indagine completa sull'edificio esistente, necessari per impostare correttamente tutti gli interventi di manutenzione straordinaria o di retrofit, nell'ottica, quanto più possibile, di “automatizzarne” i processi. Ciò che ancora appare molto lontano da quanto, in altri settori produttivi, sta consentendo il materializzarsi del paradigma dell'Industria 4.0 è, sicuramente, l'arretratezza nel settore delle costruzioni delle logiche conoscitive e di gestione degli asset esistenti. In questo senso uno dei principali ambiti in cui questi limiti stanno mostrandosi in maniera evidente, è quello del miglioramento prestazionale energetico del patrimonio. I risultati ottenibili sono, infatti, fortemente influenzati dai margini di incertezza sulla valutazione delle prestazioni residue del costruito, che ancora al giorno d'oggi, sono estremamente ampi. Le necessarie procedure conoscitive, che possono essere riassunte sinteticamente nel termine “diagnosi energetica”, sono per lo più basate su processi che, per quanto normati [6], sono sempre condotti in maniera artigianale e senza forti collegamenti con le altre fasi del processo edilizio. La finalità della diagnosi, è ormai assodato, è quella di fornire una base per la successiva fase di costruzione di un modello fisico calibrato (baseline) che sia rappresentativo della prestazione*



by “traditional” constructive and management logics, involves important challenges. The first is related to the knowledge of the asset and the digital management of information. This led to the study of the building monitoring techniques and methodologies, in order to acquire, at a later stage, information regarding the building’s internal conditions and occupation as well as the flows of the people occupying the building during the use of spaces.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. THE CASE STUDY

The Mandolesi pavilion was designed by Enrico Mandolesi in 1962 and it was approved by the Technical Administrative Committee of the Public Works Department of Sardinia on 21 November 1962. The pavilion was built between 1964 and 1970 in order to host the Institute of Mining Engineering and Applied Chemistry of the University of Cagliari. It is articulated in an underground floor, a pilotis ground floor and two upper floors. The pilotis floor, along with the roof, constitutes the leisure areas and serves as a mediator space between the two upper floors and the underground floor. There are many differences between the slabs of each level of the building: the slab of the second floor is made of concrete and hollow blocks; the slab of the first floor is divided into a central span made of concrete with hollow blocks, and two cantilever spans made of reinforced concrete.

*energetica dell'edificio allo stato attuale e che consenta quindi di stimare con attendibilità gli effetti delle possibili misure di efficientamento [7]. Allo stato attuale però ciò che viene richiesto dalle normative è ancora troppo limitato quantitativamente e qualitativamente per essere concretamente utilizzato nelle fasi di simulazione [8]. E questo è tanto più evidente quanto maggiormente approfondite sono le tecnologie con cui viene condotta la diagnosi. Nel caso, infatti, in cui vengano messe in campo quelle tecniche conoscitive che caratterizzano i livelli di diagnosi più raffinati, come il simulation [9], la quantità di informazioni è tale da richiedere una gestione informatizzata, oltre a una stretta correlazione con i dati geometrici e costruttivi dell'edificio.*

*Il contributo sperimenta l'impiego della metodologia Building Information Modelling al fine di efficientare le procedure di audit energetico sull'involucro edilizio, capitalizzandone gli esiti in un modello informativo dell'edificio che ne consenta una rappresentazione fedele, non fine a se stessa, quanto piuttosto propedeutica all'innesto dei successivi processi migliorativi su una base condivisa di conoscenza.*

*Il gruppo di ricerca è impegnato nell'applicazione del paradigma cognitivo sopra esposto ad un caso di studio di particolare interesse architettonico: il Padiglione “Mandolesi” della Facoltà di Ingegneria ed Architettura dell'Università di Cagliari, attualmente sede di parte degli uffici e dei laboratori dei Dipartimenti di Ingegneria Civile e Ambientale e Architettura e di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali. L'applicazione dei paradigmi digitali ad un caso di studio fortemente*



Figure 1. The Mandolesi Pavilion (Photo by Pierluigi Dessì).

The roof of the building is made of a double concrete slab reinforced along the two directions with the joists laid in-situ. The external wall consists of only 6 cm thick prefabricated concrete panel, with a layer of 3 cm of glass wool, an air gap of 17 cm and a layer on the inside made of solid square bricks 6x6x24, obtained by cutting in half the “double UNI” brick. The concrete panels are fixed on the edge of the slab by “T” elements in profiled iron embedded when the slab is cast. The iron frame is not only the support for the concrete panels but also for the windows that close the slot between the slab and the underlying concrete panels. There are three types of “mono-block” windows: half-height, resting on the panels; full-height, fixed directly to the floor slab; full height with vertical shading blades in fired enamelled aluminium which can be adjusted from the inside.

## 2.2. THE BIM MODEL

BIM method involves the elaboration of a parametric model of the building, with the integration of virtual items (“families”) that accurately simulate those of the building. Therefore, the construction of the model of the Mandolesi Pavilion formed an important part of the work. It can gather the information that should be shared between all the subjects involved in building management. However, before the development of the model, some important preparatory actions had to be made. Starting from the careful analysis of the proprietary information, the selection of the subject for the parametric modelling was carried out. The work focused on defining the most appropriate detail level of the model. This phase, defined as pre-modelling, is considered to be fundamental as it specifically determines the degree of graphic and information detail (LOD and LOI) needed to achieve the set goals. Depending on the purpose, the model can have different characteristics, ranging from the geometric ones to the alphanumeric ones. In the specific case of the Mandolesi Pavilion, due to its particular architectural value, the pre-modelling phase achieved a rather high level of detail for each technical element.

The complexity of the modelling of the Mandolesi Pavilion is related to the irregularity of particular elements of the building such as the pillars, beams with round edges and the internal staircase. The need to keep track of this irregularity resulted in the almost exclusive use of the “in place families” of the Revit software. The “in-place families” have the peculiarity of being created in the current project, they have the disadvantage of not being able to use them in other projects, and their massive use also generates a very heavy model file. Despite the recognized disadvantages, their use made it possible to obtain the best result for the management approach of the Mandolesi Pavilion: the

*caratterizzato da logiche costruttive e gestionali che potremmo definire quanto mai “tradizionali”, pone delle sfide importanti. La prima delle quali è, senza dubbio, quella legata alla conoscenza del cespite e alla gestione digitale delle informazioni che da essa derivano. Ciò ha comportato in prima istanza lo studio delle tecniche e delle metodologie di monitoraggio dell'edificio, al fine di acquisire, in un secondo momento, le informazioni relative alle condizioni interne e di occupazione dell'edificio così come i flussi delle persone che occupano l'edificio durante l'uso degli spazi.*

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. CASO DI STUDIO

*Con progetto elaborato dall'Ing. Enrico Mandolesi ed approvato dal Comitato Tecnico Amministrativo del Provveditorato alle OO.PP. per la Sardegna in data 21 novembre 1962, il padiglione fu costruito tra il 1964 ed il 1970 per ospitare gli istituti di giacimenti minerari, di chimica applicata e di arte mineraria della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari. L'edificio si articola su un piano interrato, un piano pilotis e due piani in elevazione. L'ampio piano pilotis agisce da filtro tra parte interrata e parte in elevazione. I solai presentano differenze sostanziali da piano a piano. Il solaio di copertura del piano interrato è stato realizzato in laterocemento; la copertura del piano pilotis si presenta articolata in due fasce laterali esterne (a sbalzo) con soletta nervata in c.a. e una fascia centrale realizzata con un solaio a casseforme a perdere in laterizio, così come la copertura del primo piano, mentre la copertura del secondo piano è stata realizzata con doppia soletta in cls armata in entrambe le direzioni con travetti armati e gettati rigorosamente in opera. La tamponatura esterna è stata realizzata utilizzando lastre prefabbricate dello spessore di soli 6 cm, uno strato di lana di vetro da 3 cm di spessore, un'intercapedine d'aria di 17 cm e una parete più interna da 6 cm in mattoni semipieni in laterizio. Il fissaggio dei pannelli in calcestruzzo sul bordo del solaio è garantito da elementi a “T” in ferro profilato annegati al momento del getto del solaio stesso. Il telaio rappresenta non solo il sostegno per i pannelli in cls del tamponamento ma anche per gli infissi che vanno a chiudere l'asola compresa tra il solaio e i sottostanti pannelli in cls di tamponamento. Per quanto riguarda le altre tipologie di infissi presenti nell'edificio in oggetto, questi possono suddividersi nelle seguenti tre categorie: a mezza altezza, poggianti sui pannelli; a tutta altezza, fissati direttamente all'estradosso del solaio; a tutta altezza con frangisole a lame verticali orientabili.*

### 2.2. IL MODELLO INFORMATIVO

*Operare in ambiente BIM significa disporre di un modello parametrico dell'edificio, integrazione di elementi virtuali (“famiglie”) che simulano fedelmente quelli costruttivi della fabbrica, pertanto la costruzione del modello del Padiglione Mandolesi ha costituito una parte importante del lavoro. Tuttavia alcune importanti*

faithful representation of the various components of the building at the level of complexity and geometric peculiarity. Avoiding excessive simplifications allowed preserving precious details for the planning of restoration and re-functionalization work.

The particular shapes of the components of the building within the modelling frame were reproduced, by using commands such as extrude, join and revolve. An important feature of the model is that it can be updated and integrated at any time in the life of the building. This aspect solves a further critical issue, namely the difficulty of ensuring the “information requirements” for the management of the building after the restoration works. The model, in fact, creates the structure which organises all the data and information that are produced during any new intervention work and that is functional to the innovative management of the building.

*azioni propedeutiche sono state condotte prima dello sviluppo del modello. A partire dalla accurata analisi del patrimonio informativo, si è proceduto alla selezione di ciò che sarebbe stato oggetto di modellazione parametrica. La complessità della modellazione del Padiglione Mandolesi è legata all'irregolarità di particolari elementi tipici del manufatto, quali i pilastri, le travi e i cordoli con spigoli arrotondati e la scala interna. L'esigenza di tenere traccia di tale irregolarità si è tradotta nell'impiego quasi esclusivo delle “famiglie locali” del software Revit. Il quadro di modellazione, attraverso l'utilizzo di comandi come l'estrusione, l'unione, la rivoluzione, ha permesso la realizzazione delle particolari forme dei componenti del manufatto architettonico. Le famiglie locali hanno la peculiarità di essere create nel contesto del progetto corrente, presentano lo svantaggio di non poter essere utilizzate in altri progetti e inoltre il loro utilizzo massivo determina un appesantimento*

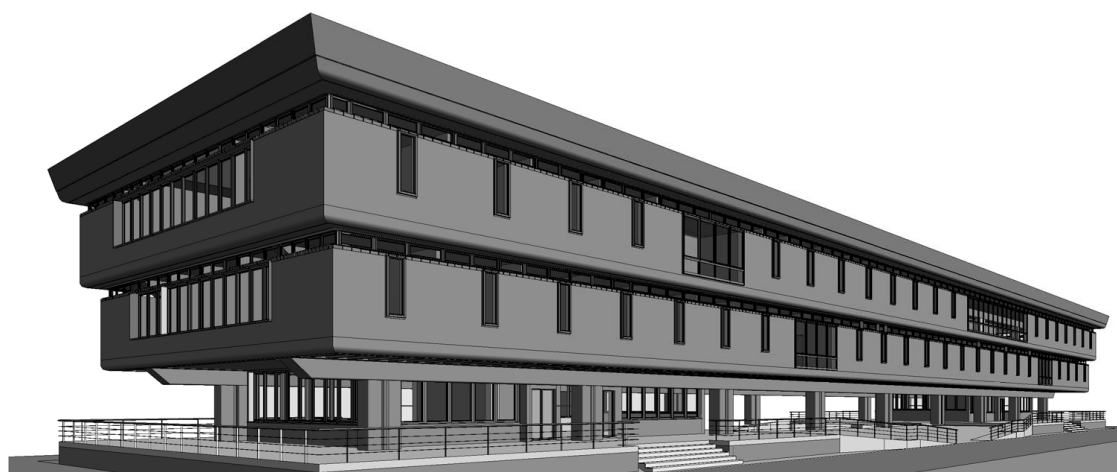


Figure 2. BIM model of the Mandolesi Pavilion.

### 2.3. THE ENERGY AUDIT AND THE BIM MODEL

As already said, the present paper is aimed at experimenting the use of Building Information Modelling methodology to optimize the energy audit procedures, with a specific focus on the building envelope. The goal is the capitalization and organization of the audit outputs in a building information model that allows their accurate representation, functional to the simulation of retrofit interventions.

According to standard UNI CEI EN 16247-2:2017 [6], the data to be collected on the building envelope during the energy audit phase are:

- Thermal transmittance values with possible improvements and limits;
- Solar shading conditions with possible improvements and limits;

*del file di modello. Nonostante gli svantaggi riconosciuti, il loro impiego ha consentito di ottenere un risultato imprescindibile per l'approccio alla gestione del Padiglione Mandolesi: la rappresentazione fedele dei vari componenti dell'edificio a livello di complessità e peculiarità geometrica, evitando eccessive semplificazioni che avrebbero determinato la perdita di dettagli preziosi per la pianificazione degli interventi di restauro conservativo e rifunzionalizzazione. Peculiarità del modello informativo costruito è la dinamicità, ossia la possibilità di essere aggiornato ed integrato in qualsiasi momento della vita del manufatto. Questo aspetto tende a risolvere un'ulteriore criticità, ossia la difficoltà di garantire il “fabbisogno informativo” per la gestione del manufatto stesso a valle degli interventi di restauro, creando la struttura attraverso cui risultano organizzati tutti i dati e le informazioni che vengono prodotte durante un nuovo intervento e che*

- Thermal inertia;
- Air tightness;
- Presence of joints and thermal bridges.

In the work, with specific reference to the case study, the issues, for which the correlation with the information model was investigated, were the first and the last. They were analyzed by the use of instrumental surveys such as heat-flux measurements [10] and IR thermographies [11]. For both the information, coming from the tests and that could be properly stored within the building model or in a supporting Common Data Environment, were identified.

Once the above-mentioned tests were carried out and the geometrical and constructive model was created according to design drawings, it was possible to associate to each element the features described in the cited European standard on energy audits [6]. With regards to external walls, the planar structure and the absence of internal thermal bridges, allowed to obtain the thermal conductivity values for all the elements and compare them with the thermal transmittance measurements, according to the calculation described in [12]. The workflow is showed in Figure 3.

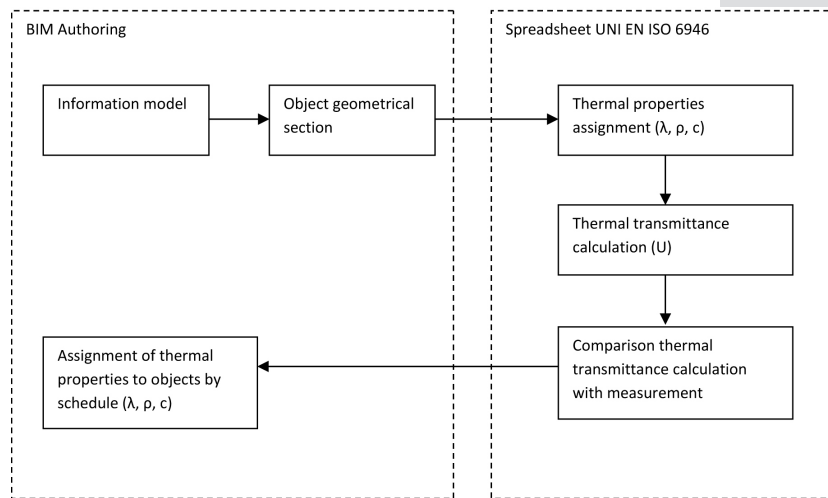


Figure 3. Workflow for the input of thermal properties of the case study external walls ( $\lambda$ : thermal conductivity;  $\rho$ : density;  $c$ : specific heat).

With reference to the slabs, the necessity to reduce their weight by hollow blocks or air cavities, due to the peculiar static scheme adopted for the building, required a numerical calculation [13] because of the presence of two-dimensional components of the thermal flux. In that case the workflow is showed in Figure 4.

The estimation of the case study thermal bridges was quite important, due to the presence of several fair-faced concrete elements. The linear thermal transmittance values were associated to the model elements affected by the

risultano funzionali ad una gestione innovativa dell'edificio.

### 2.3. L'AUDIT ENERGETICO ED IL MODELLO BIM

Come già preannunciato, il presente contributo mira a sperimentare l'impiego della metodologia Building Information Modelling al fine di efficientare le procedure di audit energetico, con specifico riferimento all'involucro edilizio. L'obiettivo è la capitalizzazione ed organizzazione degli esiti del processo di audit in un modello informativo dell'edificio che ne consenta una rappresentazione fedele e funzionale alla simulazione di interventi migliorativi.

Ai sensi della norma UNI 16247-2:2014 [6] i dati da raccogliere relativamente all'involucro edilizio durante la fase di audit energetico sono:

- I valori di trasmittanza termica degli elementi con eventuali miglioramenti e restrizioni;
- Le condizioni di ombreggiamento con eventuali miglioramenti e restrizioni;
- L'inerzia termica;
- La tenuta all'aria;
- La presenza di giunti e ponti termici.

Nel presente lavoro, e con riferimento al caso di studio citato, gli aspetti di cui si è studiata la correlazione

con il modello geometrico e costruttivo dell'edificio sono stati principalmente i primi e gli ultimi, che sono stati analizzati anche attraverso indagini strumentali, quali misure termoflussimetriche [10] e termografiche [11]. Con riferimento ad entrambe sono state individuate le informazioni che hanno caratterizzato le prove che possono essere opportunamente immagazzinate all'interno del modello informativo o di un Common Data Environment di supporto.

Una volta condotte le misure descritte e realizzato il modello geometrico-costruttivo sulla base degli elaborati grafici progettuali, è stato possibile



thermal bridges and the calculation started from their geometrical modelling. The workflow is showed in figure 5.

associare ad ogni elemento le caratteristiche termiche previste dalla citata norma sulla diagnosi energetica. Per quanto riguarda le chiusure

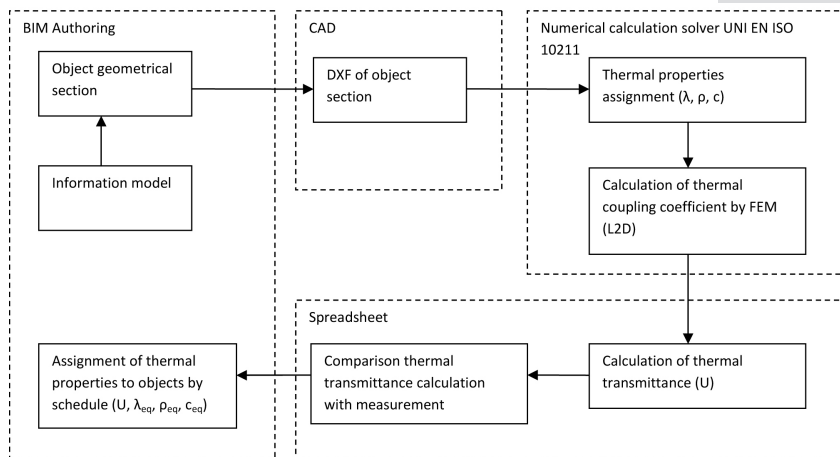


Figure 4. Workflow for the input of thermal properties of the case study slabs (L2D: thermal coupling coefficient; U: thermal transmittance).

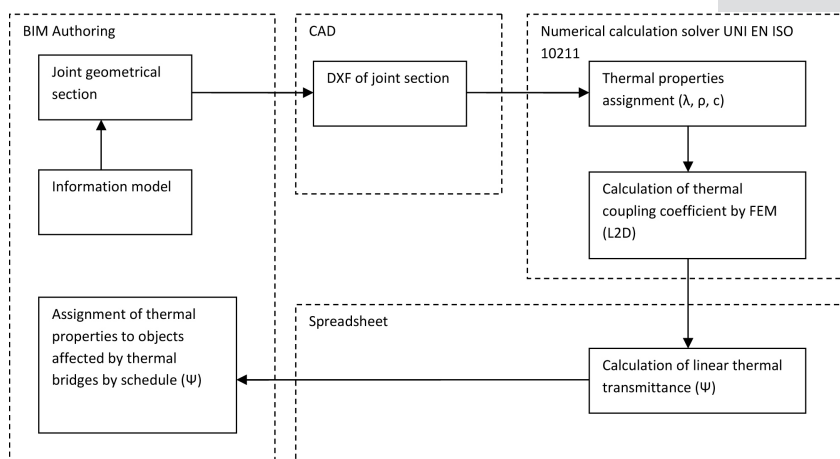


Figure 5. Workflow for the input of thermal bridges properties in the case study (Ψ: linear thermal transmittance).

### 3. RESULTS

The IR thermographies highlighted the low performance of the envelope, pointing out the presence of some thermal bridges. It successively required their accurate survey, according to the workflows described in the previous section.

The analyses of the building architectural plans, particularly of the variations during the works, made possible to define accurately the geometrical and constructive features of the envelope that was the starting point to assess its present thermal performances. The heat-flux tests carried out on the facade measured a thermal transmittance equal to 1,28 W/m<sup>2</sup>K. That, compared with the data calculated starting from the conductivity values of the external

verticali, la struttura ad elementi piani paralleli e l'assenza di ponti termici interni ad esse, ha consentito di ricavare i valori di conducibilità di tutti gli elementi e verificarli con le misure di trasmittanza, secondo il calcolo previsto dalla [12]. Il flusso di lavoro è rappresentato in Figura 3. Per quanto riguarda gli orizzontamenti, la presenza di casseforme a perdere in laterizio o di intercapedini d'aria atte ad alleggerire il peso, a causa del particolare schema statico adottato, ha richiesto una modellazione numerica [13] per la presenza di componenti bidimensionali del flusso termico. Il flusso di lavoro, in questo caso, è rappresentato in Figura 4. La valutazione dei ponti termici nel caso in oggetto è stata di particolare importanza, vista la presenza di numerosi elementi strutturali in calcestruzzo armato a vista. I valori di trasmittanza termica lineica sono stati associati agli elementi del



partition's materials, pointed out the low residual performance of the glass wool insulation. Assuming that the thickness of the insulating layer is still 3 cm, as foreseen by the design schemes, the residual conductivity is equal to 0,11 W/mK, quite higher than the value at the moment of the laying.

All the data coming from thermographies and heat-flux measurements were stored in the building information model, specifically in the schedule of the related constructive elements, in order to make them available to all the operators of a hypothetic retrofit intervention on the building. The details of all the information integrated in the model are listed in figure 6. Specifically, both the numerical data (such as the measured thermal transmittance) and the links to external images or graphs were inserted, as well as the links to the raw data acquired.

modello che sono interessati dai ponti termici e il loro calcolo è stato fatto a partire dalla modellazione geometrica del medesimo. Il flusso di lavoro è rappresentato in Figura 5.

### 3. RISULTATI

Le termografie realizzate hanno permesso di mettere in evidenza i deficit prestazionali dell'involucro, individuando la presenza di alcuni ponti termici. Questo ha condotto, successivamente, ad optare per un'analisi approfondita degli stessi, secondo i flussi di lavoro riportati nel paragrafo precedente.

Le indagini sugli elaborati progettuali, in particolare sulle perizie di variante, hanno consentito di definire con buona approssimazione la conformazione geometrica e costruttiva degli elementi dell'involucro, che è stata la base per stimare le prestazioni termiche residue. Le prove termoflussimetriche condotte sulla facciata hanno



Figure 6. Collection and management of the energy audit data through the building information model. In the centre: the schedule of the elements highlighted in the model (1). Fields for the storage of data regarding thermal bridges (2), IR images (3) and heat-flux measurements (4) were created.

The finite elements modelling of heat exchanges brought to the estimation of a thermal transmittance equal to: 3,53 W/m²K for the lower slab in the cantilever section and 0,79 W/m²K for the same slab in the central span as well as for the slab separating the first and second floor, 1,53 W/m²K for the

misurato una trasmittanza pari a 1,28 W/m²K. Questo dato, confrontato con il calcolo eseguito sulla base dei valori di conducibilità termica dei materiali costituenti la chiusura verticale, ha evidenziato la scarsa prestazione residua dell'isolamento in lana di vetro. Nell'ipotesi che lo

roof in the cantilever section and  $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$  in the central span. The different values derive from the different layers adopted during the construction phase, necessary to comply with the peculiar static scheme, not sufficiently addressed during the design phase. The building information modelling firstly made the elements sections available with a proper level of detail. Those were the base of the geometrical inputs for the finite elements solver. Then it was possible to assign exactly to each building elements its thermal performance value, as well as all the calculation files that brought to the assessment of such values (Figure 6).

Those highlighted the scarce insulating capacity of the slabs, with some very critical points, such as the cantilever span of the lower slab that will require surely additional insulation in the future (Figure 7).

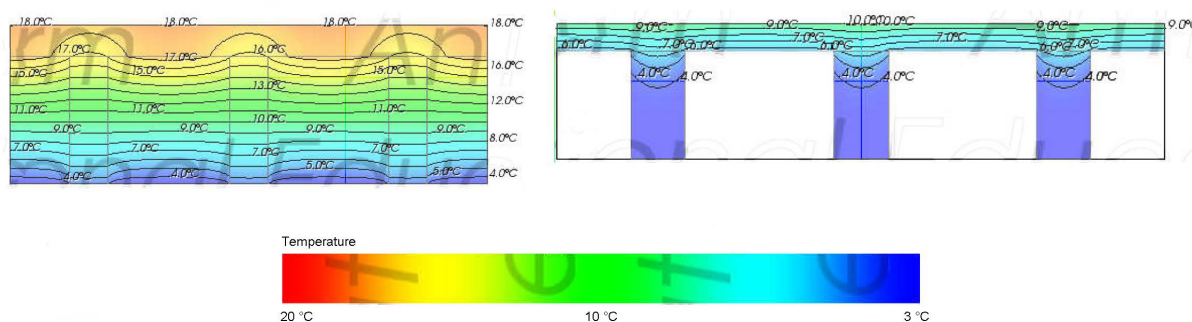


Figure 7. Thermal field by finite elements modeller of the lower slab in the central span (left) and in the cantilever one (right). In the latter the absence of hollow blocks elements reduces significantly the thermal performance and the indoor surface temperatures in design boundary condition are lower than dew point.

The envelope is also affected by several thermal bridges, due both to the openings and to the fair-facet structural elements. Again the model provided the geometrical details of the joints and the thermal properties (conductivity, specific heat and density) of the materials. The finite elements solver allowed to estimate the thermal coupling coefficient and, thus, the linear thermal transmittance ( $\Psi$ ), as described in the previous section. That was assigned in the model to all the elements delimited by a given node (Figure 6).

As is normal in building energy performance calculation, linear thermal transmittance of nodes delimiting opaque elements was equally divided between them, while the thermal bridge between openings and opaque surfaces was completely assigned to the former. In the case of the joint between the external walls and the lower slab, the linear thermal transmittance calculated was  $1,43 \text{ W/m}^2\text{K}$  and was equally halved between the former and the latter (Figure 6).

spessore sia rimasto pari ai 3 cm di progetto, la conducibilità residua è pari a  $0,11 \text{ W/mK}$ , molto più alta del valore che è possibile ipotizzare per la lana di vetro al momento della posa in opera.

Sia i dati relativi alle termografie che alla termoflussimetria sono stati immagazzinati nel modello informativo dell'edificio, in particolare nell'abaco delle proprietà dei relativi elementi costruttivi, al fine di renderli fruibili da tutti gli operatori che dovessero prender parte ad un ipotetico processo di miglioramento prestazionale dell'edificio. Il dettaglio delle informazioni inserite è evidenziato in figura 6. Nello specifico, sono stati inseriti sia valori numerici (come ad esempio la trasmittanza misurata), sia collegamenti con le immagini o i grafici risultanti dalle indagini, nonché con tutti i dati grezzi alla base delle varie elaborazioni.

La modellazione termica agli elementi finiti dei pacchetti delle chiusure

orizzontali ha portato ad una stima delle trasmittanze pari a:  $3,53 \text{ W/m}^2\text{K}$  per la chiusura di separazione del piano pilotis con il primo piano (nella parte a sbalzo),  $0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$  per le chiusure fra il primo e il secondo piano e la separazione tra piano pilotis e primo piano (in campata),  $1,53 \text{ W/m}^2\text{K}$  per la copertura nella parte a sbalzo e  $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$  per la copertura nella parte in campata. I diversi valori derivano dalle diverse configurazioni stratigrafiche adottate durante la realizzazione dell'opera e causate dal particolare schema statico dell'edificio, non adeguatamente risolto in fase progettuale. La modellazione informativa ha permesso anzitutto di poter disporre di sezioni con un livello di dettaglio adeguato, che sono state la base per l'input geometrico del solutore agli elementi finiti. Inoltre, è stato successivamente possibile associare correttamente ad ogni elemento i suoi valori di prestazione termica, nonché tutti gli elaborati che hanno condotto alla stima dei valori riportati (Figura 6). Questi sono indice di una scarsa capacità

## 4. CONCLUSIONS

The work presented so far illustrates only some of the research activities carried out on the case study building. In particular, the methodology proposed to record and analyze some of the data related to the envelope energy audit through the building information model was described. It showed to be useful firstly as the base for all the geometrical data, provided that the level of detail of the model is adequate. The possibility to extract the geometrical sections, as showed, is useful for all the thermal modelling of the complex elements or the nodes that represent thermal bridges. By the creation of a CDE (Common Data Environment) it is possible to execute such modelling with dedicated solvers and link afterwards the results to the elements in the building model.

The same can be said for the instrumental surveys that can give a more or less detailed overview on the envelope. Generally, those data are lost, or, better, condensate in the only value of transmittance. Instead, the possibility to associate the measure, not only as the final value, but also as the tabular data recorded or the IR image, with the object representing a given element in the model, increase the set of information that remain available for future operations on the building.

The next steps of the research will focus on data, such as hourly air changes or shading factors, that are listed among the ones compulsory in energy audit standard procedures and that can be integrate in the building model as well. All these information are essential to carry out a correct planning and simulation of the energy retrofit interventions. It is also true that, regardless of the detail level of such simulations instruments, the baseline information set need to be associated with the asset model and it is not necessarily prerogative of the only simulation phase.

## 5. REFERENCES

- [1] McKinsey, Industry 4.0 at McKinsey Model Factory. McKinsey & Company, Inc., 2016.
- [2] McKinsey, Industry 4.0 How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey & Company, Inc., 2015.
- [3] Pfohl HC., Yahsi B., Kurnaz T., The Impact of Industry 4.0 Supply Chain. Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chain. International Conference of Logistics (HICL), 2015.
- [4] Angelov P., Autonomous Learning Systems: From Data Streams to Knowledge in Real-time. John Wiley & Sons, 2012.
- [5] Martani C., Lee D., Robinson P., Britter R., Ratti C., ENERNET: Studying the dynamic relationship between building occupancy and energy consumption. Energy and Buildings 47: 584-591, 2012.
- [6] UNI CEI EN 16247-2, Diagnosi energetiche – Parte 2: Edifici, 2014.
- [7] Ham Y., Golparvar-Fard M., Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling, Automation in construction 49, 214-224, 2015.
- [8] Niu M., and. Leicht R.M., Information exchange requirements for building walk-through energy audits, Science and Technology for the Built Environment 22, 328–336, 2016.

di isolamento degli orizzontamenti, con alcune criticità, come quella delle estremità del solaio più basso, che richiederanno sicuramente interventi di coibentazione (Figura 7).

L'involucro, come detto, è anche fonte di numerosi ponti termici, dovuti sia agli infissi che agli elementi strutturali in vista. Anche in questo caso il modello ha fornito la geometria di base e i parametri termici (conducibilità, calore specifico e densità) di tutti i materiali costituenti un determinato nodo. Il solutore agli elementi finiti ha permesso poi di stimare il coefficiente di accoppiamento termico, e, quindi, la trasmittanza termica lineica, come descritto nel paragrafo precedente. Questa è stata associata, nel modello, ai vari elementi che concorrono ad un determinato nodo (Figura 6). Come prassi nel calcolo termico, la trasmittanza lineica dei ponti termici delimitanti gli elementi opachi è stata suddivisa fra le superfici concorrenti, mentre quella infisso-parete è stata associata completamente all'infisso. Nel caso, ad esempio, del nodo chiusura verticale - solaio separazione piano pilotis-primo piano, il valore di trasmittanza termica lineica calcolato è pari a 1,43 W/mK, suddiviso equamente tra la prima ed il secondo.

## 4. CONCLUSIONI

Il lavoro fin qui esposto illustra solo alcune delle attività di ricerca messe in campo sull'edificio caso di studio. In particolare, è stata descritta la metodologia proposta per registrare e analizzare alcune delle informazioni relative all'audit energetico sull'involucro edilizio attraverso il modello informativo dell'edificio. Questo si rivela utile anzitutto perché fornisce una base di dati geometrici, purché il livello di dettaglio della modellazione sia adeguato. La possibilità di estrapolare sezioni geometriche, come visto, è utile per tutte le modellazioni termiche di elementi con stratigrafie complesse o di nodi che costituiscono ponti termici. Attraverso la creazione di un CDE (Common Data Environment) è possibile eseguire tali modellazioni con software dedicati e ricollegare poi i risultati agli elementi interni al modello.

Discorso analogo è possibile fare per le indagini strumentali che consentono di avere una panoramica più o meno dettagliata sull'involucro. Normalmente questi dati vengono persi, o meglio, sono condensati in un unico valore, quello della trasmittanza. La possibilità invece di associare la misura, non solo tramite il suo output finale, ma anche attraverso la serie tabellare di dati registrati all'oggetto rappresentante nel modello la parete in questione, o la stessa immagine termografica, ne amplia decisamente il corredo informativo, rimanendo a disposizione degli operatori futuri.

Le prossime fasi della ricerca verteranno sui dati, quali ad esempio ricambi orari d'aria o il valore di ombreggiatura, inclusi dalle normative fra quelli necessari per l'audit energetico, che possono essere anch'essi inseriti nel modello informativo. Tutti queste informazioni sono di vitale importanza per eseguire correttamente la pianificazione e la simulazione degli interventi migliorativi da metter in campo sotto

- [9] Dall'Ò G., Green energy audit: manuale operativo per la diagnosi energetica e ambientale degli edifici. Edizioni Ambiente, 2011.
- [10] ISO 9869 Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method, 2014.
- [11] UNI EN 13187 Prestazione termica degli edifici - Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all'infrarosso, 2000.
- [12] UNI EN ISO 6946 Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo, 2008.
- [13] UNI EN ISO 10211 Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati, 2008.

*il profilo energetico. È anche vero però che, al di là degli strumenti più o meno dettagliati per eseguire tali simulazioni, il corredo informativo di partenza deve essere associato al modello del cespite e non necessariamente appannaggio della sola simulazione.*