

# Diagnosi, simulazione e ottimizzazione energetica degli edifici storici

## Energy diagnosis, simulation and optimization of historic buildings

ELENA LUCCHI<sup>1</sup>, FRANCESCA ROBERTI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eurac Research, BZ – Politecnico di Milano, MI

<sup>2</sup> Eurac Research, BZ – Libera Università Bolzano, BZ

### RIASSUNTO.

La valutazione del comportamento energetico e ambientale degli edifici storici è un tema complesso, che richiede un approccio interdisciplinare, procedure di diagnosi e strumenti di simulazione dedicate.

Il lavoro definisce un metodo integrato di diagnosi e di simulazione energetica e ambientale, che permette di identificare inefficienze, sprechi e malfunzionamenti e di definire gli interventi di riqualificazione più appropriati. La raccolta delle informazioni nasce dalla sintesi di protocolli e normative esistenti ed è così strutturata: analisi dell'edificio (storica, conservativa, funzionale, gestionale, tecnologica), diagnosi energetica strumentale e monitoraggio ambientale. Per ogni fase si definiscono le informazioni necessarie, le procedure diagnostiche e i parametri da misurare per simulare il più correttamente possibile il comportamento reale.

Successivamente, partendo da un modello di simulazione termodinamica calibrato sulle temperature interne, si introduce un metodo di ottimizzazione multi-obiettivo degli interventi di *retrofit*, secondo i parametri di efficienza energetica, comfort ambientale e conservazione dei valori storici. La procedura è stata applicata alla Casa della Pesa di Bolzano, per sperimentarne i contenuti e verificarne la validità.

### SUMMARY.

The assessment of energy and environmental behavior of historic buildings is a complex issue, which requires interdisciplinary approaches, dedicated diagnostic procedures and simulation tools.

The work defines an integrate method for energy and environmental diagnosis and simulation of historic buildings, in order to identify inefficiencies, wastes and malfunctioning and define the most appropriate retrofit measures. The data collection synthetizes the existing protocols and standards. It is structured in the following phases: building analysis (historic, conservative, functional, managerial, and technological), energy audit and environmental monitoring. For each phase, we define necessary information, diagnostic procedures and parameters to be measured for simulating correctly the current behavior.

Next, starting from a dynamic simulation model calibrated on the interior temperatures, we introduce a method for multi-objective optimization the energy and environmental retrofit, considering energy efficiency, human comfort, and conservation of historic values. The methodology has been applied to the *Casa della Pesa* in Bolzano, to verify the validity.

Parole chiave: diagnosi energetica, diagnosi non invasiva, simulazione termodinamica, calibrazione di modelli

Key words: energy audit, non-destructive techniques, energy simulation, model calibration

## 1. INTRODUZIONE

La verifica delle prestazioni e del comportamento energetico di un edificio esistente è una fase importante per ottimizzare la scelta degli interventi di risanamento conservativo, in quanto consente di bilanciare le esigenze di tutela, efficienza energetica, sostenibilità ambientale e comfort degli utenti. La normativa italiana (UNI TS 11300, 2014) identifica tre livelli di valutazione delle prestazioni. Il primo analizza il comportamento energetico nella fase di progettazione preliminare e, pertanto, è basato sull'uso di tecniche, procedure e strumenti semplificati, che consentono il rapido confronto tra diverse soluzioni. Il secondo livello certifica il rendimento energetico del sistema edificio-impianto secondo una procedura trasparente e confrontabile, che normalizza le informazioni di uso e gestione.

La "certificazione energetica", introdotta a livello europeo (Direttive 2002/91/CE e 2010/31/UE) e ripresa a livello nazionale da un impianto legislativo ampiamente modificato da riprese e correzioni (D.Lgs. 192/2005; D.Lgs 311/2006; D.M. 26/06/2009; DPR 59/2009; D.Lgs. 63/2013; D.I. 26/6/2015), è obbligatoria per interventi di nuova costruzione, riqualificazione e transizione onerosa di edifici, oltre che per la stipula di contratti di gestione degli impianti di climatizzazione di edifici pubblici. È pensata anche per incentivare il miglioramento delle caratteristiche energetiche di edifici nuovi ed esistenti. Infine, il terzo livello consiste in una "(...) *procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo di un edificio, di un gruppo di edifici, di un'attività, di un impianto industriale o di un servizio pubblico o privato, ad individuare e a quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e a riferire in merito ai risultati*" (Direttiva 2012/27/UE, art. 1, comma 25). La "diagnosi energetica", introdotta con la Direttiva 2006/32/CE e modificata con la Direttiva 2012/27/UE, è obbligatoria per interventi di riqualificazione edilizia o impiantistica su edifici pubblici.

A livello nazionale, è stata recepita con i D.Lgs. 115/2008 e 102/2014, che oltre ad attuare le disposizioni europee, obbligano anche le imprese grandi o con un elevato consumo energetico, introducono le figure dell'Esperto di Gestione dell'Energia (EGE) e dell'Energy Manager (EA), definiscono i criteri di un audit e prevedono l'istituzione di un fondo nazionale per l'efficienza energetica, di banche dati e di controlli di conformi-

tà. Le procedure di attuazione di certificazione e di diagnosi energetica sono definite nella legislazione nazionale (D.I. 26/6/2015) e normativa tecnica (UNI TS 11300, 2014), che spesso sovrappone i due livelli analitici.

Un discorso a parte merita il tema della riqualificazione energetica del patrimonio storico. La legislazione nazionale, riprendendo sostanzialmente le disposizioni europee, introduce degli obblighi minimi di miglioramento delle prestazioni energetiche del patrimonio storico, che viene diviso in: “*beni tutelati*” e tutti gli “*altri edifici*”.

I primi sono esclusi dall’obbligo di rispetto di tali requisiti nei casi in cui possano causare “(...) *un’alterazione inaccettabile del carattere o dell’aspetto storico*” (Direttiva 2010/31/UE, art. 4 comma 2; D.Lgs. 311/2006, art. 3 comma 3). Gli immobili storici non vincolati, invece, sono interamente sottoposti a questi dettami e devono raggiungere prestazioni analoghe alla nuova costruzione in fatto di riduzione delle perdite per trasmissione (quando si interviene su un singolo componente) e del fabbisogno energetico (quando si agisce sull’intero edificio).

In pratica, quando viene realizzato un’azione “*importante*” (demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria, ristrutturazione, l’ampiamiento di ampie parti edilizie) si chiede un intervento globale, che coinvolge l’intero edificio. Al contrario, quando si fanno piccole opere di ristrutturazione o di ampiamiento, è possibile intervenire solo sull’involucro edilizio. Per quanto riguarda la “*diagnosi energetica*”, invece, non sono previsti obblighi particolari per gli edifici storici, comparandoli di fatto all’edilizia esistente. In entrambi i casi, vi è la mancanza di linee guida e di standard normativi e legislativi completi e chiari (Dall’O’, 2012).

## **2. DIAGNOSI ENERGETICA DEGLI EDIFICI STORICI**

Negli ultimi anni sono state definite diverse procedure di diagnosi energetica. Le prime ricerche riguardavano prevalentemente la gestione dell’energia (CRES, 2000; Turner e Doty 2007; Capehart et al., 2008) e il controllo dei sistemi impiantistici (IE-SNA, 2000), mentre in seguito sono state elaborate anche linee guida operative (EPA, 1998; ASHRAE, 2006; EEO, 2007).

Più recentemente è stata definita una metodologia che considera tre livelli di valutazione del sistema edificio-impianto (Thumann e Younger, 2008). Il primo (“*Walk-through-Audit*”) valuta in modo semplificato l’efficienza energetica dell’edificio, per rilevarne le inefficienze; il secondo (“*Standard Audit*”) quantifica i consumi dei singoli componenti edilizi e impiantistici che hanno problemi particolari e, infine, il terzo (“*Simulation Audit*”) elabora un modello di calcolo termodinamico volto a quantificare le prestazioni energetiche nelle effettive condizioni d’uso.

La procedura è stata ampiamente ripresa dalla letteratura (Kreith e Goswami, 2007 e 2008; Dall’O’, 2011; Dall’O’ et al., 2012) e dalla normativa (UNI CEI EN 16247, 2012). Parallelamente, si sta mettendo a punto una procedura specifica di diagnosi energetica degli edifici storici, attualmente in fase di discussione (CEN/TC 346, 2009-2014). Infine, le tecniche di riqualificazione degli edifici esistenti sono ampiamente trattate (Wulfinghoff, 1999), ponendo attenzione anche agli aspetti di sostenibilità ambientale (Dall’O’ et al., 2012).

Esiste anche una trattativa sul risanamento energetico del patrimonio storico, con un'attenzione agli aspetti operativi e ai problemi di degrado e di impatto conservativo che si possono generare (Changeworks, 2008; English Heritage, 2008; English Heritage, 2010; Lucchi e Pracchi, 2013; SPAB, 2014). A livello nazionale, sono stati anche elaborati dei protocolli di valutazione energetica e ambientale del patrimonio storico (MVBC, 2010; AICARR, 2012; GBC, 2013).

## 2.1. Procedura diagnostica

Una corretta prassi operativa prevede l'integrazione tra le tecniche di restauro conservativo, diagnosi energetica, valutazione prestazionale e analisi del comfort, al fine di restituire una visione complessiva e di definire gli interventi di riqualificazione più opportuni.

Si propone un metodo operativo conforme alla normativa (CEN/TC 346, 2009-2014; UNI CEI EN 16247, 2012) e ai protocolli di sostenibilità (MVBC, 2010; AICARR, 2012; GBC, 2013), strutturato nelle seguenti fasi: (i) analisi documentaria; (ii) analisi funzionale dell'utilizzo pregresso, corrente e futuro dell'edificio; (iii) diagnosi energetica e simulazione termodinamica; (iv) definizione degli interventi di efficientamento energetico più opportuni; (v) realizzazione degli interventi.

L'analisi documentaria della storia dell'edificio permette di capire l'evoluzione che ha avuto l'immobile nel tempo, giustificando anche la presenza di determinate tecnologie, materiali, modalità di posa in opera, disomogeneità e danneggiamenti. Essa si compone di: rilievo geometrico; analisi storica e documentaria; stato di conservazione dei materiali; analisi delle patologie di degrado. L'analisi funzionale invece è particolarmente utile per definire le possibilità di uso futuro, in riferimento alle potenzialità e ai limiti effettivi del bene. La diagnosi energetica e la simulazione termodinamica si basano su attività sistematiche di rilievo, raccolta e analisi di informazioni relative ad aspetti edilizi (ubicazione, geometria, dimensioni dell'edificio e caratteristiche termofisiche dell'involucro), impiantistici (prestazioni degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione artificiale, sistema elettrico) e gestionali (utilizzo, numero di persone, orari e giorni di funzionamento e di attivazione degli impianti).

La raccolta delle informazioni termofisiche può avvenire attraverso l'impiego delle tecniche non distruttive, quali la termografia a raggi infrarossi, il *Blower Door Test* (BDT), il *Penetrant Test*, l'analisi sonica (AS), l'analisi termoflussimetrica (HFM) e il monitoraggio energetico e ambientale (Lucchi, 2012).

La termografia mappa la temperatura superficiale apparente dei corpi, identificando la presenza di problematiche strutturali, energetiche, conservative e impiantistiche legate alla stratigrafia dell'involucro, ai materiali, allo stato di conservazione, alle tecniche di posa, alla presenza di infiltrazioni d'aria, acqua, germinazioni microbiche, umidità interstiziale, distacchi superficiali, malfunzionamenti impiantistici, inefficienza dei sistemi solare fotovoltaico e termico (ISO 6781, 1983). L'analisi può essere supportata dal BDT e dall'esame con liquidi penetranti per localizzare e quantificare le infiltrazioni d'aria provenienti da componenti edilizi, giunzioni e fessurazioni (ISO 9972, 2006) e da indagini soniche che forniscono informazioni sull'omogeneità di una parete e, quindi, sui materiali costituenti.

Le caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio sono misurate dalla termoflussimetria (resistenza e la conduttanza termica) (ISO 9869, 1994) e dalle tecniche debolmente distruttive, come l'endoscopia e il carotaggio, che forniscono indicazioni sulle stratigrafie e sulle proprietà termiche e meccaniche dei materiali. I dati relativi alla gestione, alla conservazione e al funzionamento impiantistico possono essere ottenuti mediante un esame visivo e, infine, il monitoraggio ambientale fornisce informazioni oggettive sulle reali modalità di utilizzo dell'edificio da parte degli utenti (EN 15758, 2010).

Le informazioni devono poi essere rielaborate attraverso l'ausilio di strumenti di simulazione per capirne le prestazioni e i consumi energetici.

I software hanno livelli di accuratezza differenziati in base alla finalità dell'indagine, alla sofisticazione degli algoritmi di calcolo, all'utenza cui si rivolgono, alla modalità di introduzione dei dati, etc.

Le procedure attualmente in uso sono basate su due modalità di calcolo: (i) regime quasi stazionario, effettuato su base mensile o stagionale, che prevede semplificazioni nell'introduzione delle informazioni relative agli scambi termici che interessano l'edificio; (ii) regime dinamico che considera intervalli di tempo brevi al fine di tenere conto del calore accumulato e rilasciato dalla massa dell'edificio. In particolare, la modellazione energetica di tipo dinamico è basata su un approccio integrato volto a valutare l'intero sistema edificio-impianto dal punto di vista costruttivo e gestionale in quanto analizza simultaneamente i flussi termici, elettrici, luminosi, acustici, ventilativi, il comportamento e le modalità di utilizzo degli occupanti.

I sistemi richiedono una perfetta conoscenza di dati geometrici, climatici, termofisici e gestionali, molto difficilmente ottenibile per gli edifici storici. I problemi principali riguardano il reperimento di dati sulle proprietà di parti degradate e/o composte da più materiali antichi non presenti nelle banche dati normative. Inoltre, in molti casi neppure le analisi strumentali in situ possono essere di aiuto nel reperimento di tutti i dati necessari e caratteristiche dei materiali come densità e calore specifico devono essere analizzate in laboratorio. Per migliorare l'attendibilità dei risultati è necessario calibrare il modello, ovvero valutarne la rappresentatività dei risultati rispetto ai dati monitorati. Il modello va calibrato utilizzando come parametri di input dati il più possibile vicini alla realtà, collocati quindi all'interno di un *range* di incertezza nel quale sono da considerarsi rappresentativi.

## **2.2. Ottimizzazione degli interventi di retrofit**

Il modello calibrato può essere poi utilizzato come strumento di confronto tra diverse soluzioni di risanamento energetico, al fine di definire i benefici legati a ciascuna tecnologia rispetto al fabbisogno complessivo e al comfort ambientale.

Nel caso di un edificio storico, questi aspetti devono essere strettamente bilanciati con l'esigenza di mantenere inalterato il valore e le caratteristiche originali. L'ottimizzazione di questi tre aspetti (energia, conservazione, comfort) può essere combinata attraverso l'utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione multi-obiettivo come l'NSGAI (Deb et al., 2002), che individua il fronte di Pareto, ovvero l'insieme cioè delle soluzioni non dominate e quindi migliori per uno almeno dei due obiettivi. Su questo argomento è stata pubblicata un'ampia letteratura riferita principalmente agli edifici esi-

stenti e all'ottimizzazione di riduzione dei consumi ed emissioni di CO<sub>2</sub> e di costi di investimento (Chantrelle et al., 2011; Hamdy et al., 2011).

Considerando la possibilità di utilizzare l'algoritmo genetico NSGA II, è stata sviluppata una metodologia operativa che prevede la selezione di interventi di riqualificazione energetica, la valutazione del loro impatto sulla conservazione, la quantificazione dei consumi energetici attraverso il modello calibrato sulle temperature rilevate nel monitoraggio; l'individuazione degli interventi ottimali per gli obiettivi di conservazione, consumo energetico e comfort (Roberti et. al., 2015). Per riuscire a confrontare i risultati attraverso la simulazione dinamica, si è deciso di concentrare le analisi su tre variabili ritenute fondamentali nel caso di edifici storici: l'efficienza energetica, l'impatto sulla conservazione e il comfort degli occupanti. Sono stati esclusi invece gli aspetti economici, che si è preferito analizzare in modo più dettagliato dopo avere scelto le soluzioni ottimizzate.

La selezione delle soluzioni di retrofit è partita dall'analisi dei sistemi di risanamento energetico consigliati da diverse linee guida internazionali (Changeworks, 2008; English Heritage, 2008 e 2010; SPAB, 2014), concentrandosi maggiormente sulle soluzioni passive. Sulla base delle ricerche in atto si è cercato poi di definire l'impatto generato da ciascuna misura sul patrimonio culturale.

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura affronta il tema in modo qualitativo, stabilendo indicatori di impatto sulla tutela (Bundesdenkmalamt, 2011; Eriksson et al., 2014), sul risparmio energetico e sulla durabilità (Boriani et al., 2011). Normalmente, in questi casi, si stabilisce se i diversi interventi di risanamento hanno o meno un impatto sulle diverse variabili (tutela, durabilità, ...). Solo in alcuni casi, si presentano risultati quantitativi sulla loro compatibilità con la conservazione (Grunewald et al., 2010), attribuendo una scala di valori da 1 a 5 all'impatto delle diverse misure di riqualificazione. La letteratura distingue l'impatto in tre tipologie, a seconda dell'effetto che provoca sul bene culturale: (i) "visivo", riferito alla modifica dell'apparenza estetica del bene; (ii) "fisico", connesso con la conservazione degli aspetti materici originari e (iii) "spaziale", relativo all'alterazione di dimensioni e rapporti (Eriksson et al., 2014).

Partendo da questi lavori, è stato creato un gruppo multi-disciplinare (restauratori, conservatori, esperti di efficienza energetica, ...) che ha quantificato gli impatti dei diversi interventi sull'edificio storico, partendo da una matrice di valutazione (Figura 1).

Importanza della conservazione del patrimonio culturale																					
		Finestre			Muratura perimetrale						Copertura			Muri interni			Solette e soffitti				
		visivo	fisico	spaziale	Superficie esterna			Superficie interna			visivo	fisico	spaziale	visivo	fisico	spaziale	visivo	fisico	spaziale		
Finestre	Aspetto	visivo																			
		fisico																			
		spaziale																			
Muratura perimetrale	Superficie esterna	visivo																			
		fisico																			
		spaziale																			
	Superficie interna	visivo																			
		fisico																			
		spaziale																			
Copertura	visivo																				
	fisico																				
	spaziale																				
Muri interni	visivo																				
	fisico																				
	spaziale																				
Solette e soffitti	visivo																				
	fisico																				
	spaziale																				

**LEGENDA**  
**Importanza della conservazione**  
 0 = Uguale  
 1 = Leggermente maggiore  
 2 = Moderatamente maggiore  
 3 = Fortemente maggiore  
 4 = Molto più forte  
 5 = Estremamente maggiore  
 -1 = Leggermente minore  
 -2 = Moderatamente minore  
 -3 = Fortemente minore  
 -4 = Molto meno forte  
 -5 = Estremamente minore

Figura 1 – La matrice di valutazione utilizzata per valutare l'impatto sulla conservazione dei diversi interventi di risanamento

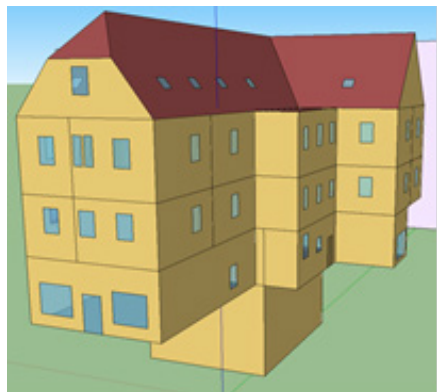
Il lavoro si è svolto in tre fasi. Nella prima gli esperti di conservazione hanno quantificato l'importanza dell'impatto visivo, fisico e spaziale per ogni componente dell'edificio, assegnando un punteggio generale e indipendente dal caso studio (da 1 a 5). Nella seconda fase, i conservatori hanno valutato con 0 o 1 se ogni impatto era compatibile o meno con l'intervento di risanamento proposto degli esperti di efficienza energetica, considerando le caratteristiche specifiche del caso studio (Roberti et al., 2015). Nella terza fase si è ottenuto il valore finale di conservazione per ogni intervento moltiplicando le due matrici di punteggio e di 1/0. La quantificazione dell'impatto ci ha permesso di inserire i risultati di ciascun intervento di riqualificazione nell'ottimizzazione multi-obiettivo.

### 3. CASO STUDIO

Il metodo è stato applicato alla Casa della Pesa di Bolzano, un edificio di origini romaniche che è stato oggetto del progetto di ricerca 3ENCULT, dedicato all'efficienza energetica degli edifici storici (Troi e Bastian, 2014). L'edificio ha subito poi ampliamenti e modifiche nelle epoche gotiche, rinascimentali e neoclassiche.

Fino al 1780 ospitava la bilancia calibrata per pesare le merci prima del loro ingresso sul mercato, mentre nella prima metà del XX secolo fu trasformata in abitazione ed edificio commerciale.

È composto da tre piani, un sottotetto e due piani interrati di cantine. L'edificio non è riscaldato (Figura 2).



*Figura 2 – L'edificio oggetto di studio e il suo modello energetico*

Di seguito sono riportate le caratteristiche dimensionali e costruttive dell'edificio (Tabella I).

## **Tabella I – Informazioni generali sull'edificio**

### **Dimensioni dell'edificio**

Superficie totale: 1390 m <sup>2</sup>	Volume: circa 5000 m <sup>3</sup>
Superficie disperdente dell'involucro: Opaco 1715 m <sup>2</sup> - Trasparente 154 m <sup>2</sup>	Piani: 3 fuori-terra e 2 interrati

### **Caratteristiche costruttive**

Muratura portante	Pietra naturale intonacata su entrambe le facce (intonaco di calce), spessore 0.60-0.80 m
Pareti di partizione	Pietra naturale intonacata su entrambe le facce, spessore 0.30 m
Copertura	Struttura portante in legno, rivestita con coppi e tegole. È parzialmente isolato con 0.8 m di lana minerale coperta con pannelli di cartongesso
Solette	Strato esterno in legno massello riempito con materiale di scarto (sassi, sabbia, mattoni rotti,...), spessore 0.30-0.40 m
Basamento	Pietra naturale
Finestre	Serramenti in legno massello e vetro singolo tipo float. La maggior parte è stata sostituita negli anni 1950/60

### **3.1. Diagnosi energetica**

L'analisi diagnostica ha riguardato: (i) inventario di quanto andava salvaguardato; (ii) prove non distruttive e debolmente distruttive per identificare i materiali di costruzione e le prestazioni energetiche dell'intero edificio e (iii) monitoraggi ambientali. La selezione delle parti da salvaguardare si è basata sulla ricerca storico-archivistica e sulle fonti documentarie rinvenute, che hanno permesso di individuare le epoche costruttive delle diverse parti dell'edificio e di identificare i componenti di pregio. La ricerca documentaria ha guidato anche l'analisi diagnostica, permettendo di definire il tipo di prove da effettuare per localizzare la presenza di tracce storiche nascoste dai diversi rimaneggiamenti (chiusure murate, archi, stratigrafie e intonaci originari, superfetazioni), oltre che di disomogeneità e degradi di vario genere (fessurazioni, cricche, danneggiamenti, elementi mancanti, usura, ...).

Le prove strumentali hanno riguardato: rilievo geometrico (RG), esame visivo (EV), termografia IR, termoflussimetria (HFM), BDT, gas traccianti, analisi stratigrafica e carotaggi di campioni analizzati in laboratorio (ML).

Queste prove strumentali hanno dato informazioni di dettaglio di tipo qualitativo e quantitativo relative alle prestazioni termofisiche dell'involucro edilizio, alla tenuta all'aria dell'edificio e alla presenza di degradi.



Le termografie IR, le stratigrafie e i carotaggi hanno mostrato la presenza di una struttura portante in muratura di pietra naturale intonacata su entrambe le facce nei tre piani fuori-terra e a vista nei due piani interrati. L'analisi visiva effettuata dai conservatori della Soprintendenza locale ha evidenziato la presenza di intonaco dotato di pregio storico, con alcune tracce decorative che risalgono all'epoca gotica e rinascimentale. Le analisi soniche effettuate da due restauratori operati a livello locale hanno permesso di capire anche la tenuta meccanica dell'intonaco e, dove necessario di effettuare delle opere di consolidamento materico. L'analisi visiva ha fornito indicazioni sulle caratteristiche strutturali della copertura che è realizzata con travi di legno massello.

Vi è un isolamento termico in lana minerale e un rivestimento interno in cartongesso. Lo strato esterno è realizzato con coppi e tegole, che nella maggior parte dei casi sono stati sostituiti nel secondo dopoguerra. Le analisi stratigrafiche hanno mostrato che i solai interpiano sono costituiti da un duplice strato in legno e hanno un riempimento in materiale di scarto da cantiere (terra, sabbia, mattoni, ...). I soffitti della parte realizzata in epoca rinascimentale sono voltati oppure hanno delle decorazioni a stucco che, secondo quanto riferito dalla Soprintendenza, sono state realizzate in epoche successive. Gli altri soffitti non hanno decorazioni di pregio.

Le finestre originali sono state sostituite nel secondo dopoguerra con doppie finestre schermata all'esterno con persiane in legno. L'analisi visiva effettuata da esperti di serramenti storici ha permesso di scoprire l'esistenza di telai fissi originari inseriti all'interno di pareti e solo parzialmente visibili, che sono stati mantenuti e riutilizzati per l'inserimento di nuove finestre compatibili con quelle tradizionali. La presenza di telai originari ha anche permesso di capire lo spessore e il tipo di legno usato in passato ( $s = 0.05$  m e legno di larice). Non vi è la presenza di vetri antichi e tutti i serramenti sostituiti nel secondo dopoguerra hanno un vetro singolo tipo float ( $s = 3$  mm).

Le analisi termografica e stratigrafica non hanno rilevato la presenza di tracce di degrado, umidità interstiziale o malfunzionamenti di vario genere.

Pertanto non si è ritenuto necessario approfondire questo tipo di studi con ulteriori analisi strumentali. Le prestazioni termofisiche dell'involucro sono piuttosto buone, mentre le infiltrazioni d'aria sono abbastanza elevate sia attraverso i serramenti che le giunzioni.

Parallelamente, è stato monitorato l'andamento di umidità relativa e temperatura dell'aria dell'ambiente e della temperatura superficiale di pareti e solette e per dare informazioni sul comportamento termoigrometrico dell'edificio (Roberti et al., 2014). Il monitoraggio è stato effettuato tramite dei termistori e capacitori realizzati dall'Università di Stoccarda e collegati a un sistema centralizzato di monitoraggio controllabile anche da remoto.

Il modello di simulazione termodinamica è stato poi realizzato con il software Energyplus 7.2, sulla base dei risultati delle prove strumentali e poi calibrato sulla base dei monitoraggi termici (Tabella II).

**Tabella II – Dati termofisici dell’involucro edilizio**

Componente	Difficoltà	Parametro	Input del modello	Fonte
Muratura esterna	Spessori diversi e mancanza di omogeneità	C	1.23 (parete)	HFM in situ
		U	1.04 (medio)	Calcolo da HFM
		s	0.65	RG
		$\rho$	2450	ML*
		$c_s$	700	
Copertura	Spessori diversi, degrado e danneggiamenti	C	3.84 (non isolato)	HFM in situ
		U	1.74 (isolato)	Calcolo da HFM
		U	2.29 (non isolato)	
		U	2.60 (isolato)	
		$c_s$	700	ML*
Solette interne	Mancanza di omogeneità	C	-	Non misurabile per assenza $\Delta T$
Solette sull'esterno		U	0.44	Calcolo da HFM
Basamento	Impossibilità di misura diretta con HFM	U	2.70	Calcolato da ML
Muro di partizione interna	Spessori diversi e stratigrafie disomogenee	$\lambda$	0.89	ML*
		s	0.2	RG
		$\rho$	2450	ML*
		$c_s$	700	
Tenuta all'aria dell'involucro	Valori diversi per fessurazioni di muri e danni alle finestre	IA	27 valori diversi	BDT e gas traccianti
Finestre	Vetri e cornice danneggiati	FSV	0.6	Esame visivo, valore da database
		U	2.8 (vetro) 2.5 (telaio)	Valore da database
		g	0.77	

**Note:**

C = Conduttanza, W/m<sup>2</sup>K      U = Trasmittanza termica, m<sup>2</sup>K/W      s = Spessore, m

$\rho$  = Densità, kg/m<sup>3</sup>       $c_s$  = Calore specifico, J/kgK      IA= Infiltrazione d'aria, m<sup>3</sup>/s

FSV= Fattore di sporcizia del vetro, adim.      g = fattore solare (%)

\*misure effettuate dall'Università Tecnica di Dresda

### 3.1. Ottimizzazione degli interventi di retrofit

Partendo dalle soluzioni di risanamento evidenziate nella fase iniziale di lavoro, sono stati individuati i materiali e le tecniche di intervento più indicati rispetto al particolare caso studio. Si è deciso di considerare solo le misure passive (Changeworks, 2008; English Heritage, 2008; English Heritage, 2010; Lucchi e Pracchi, 2013; SPAB, 2014). Utilizzando l'algoritmo genetico NSGAI sono state identificate 81 soluzioni non dominate (Roberti et al., 2014; Roberti et al. 2015). Le soluzioni hanno riguardato: (i) isolamento dell'involucro edilizio (basamento, copertura e pareti); (ii) miglioramento della tenuta all'aria dell'edificio e dei serramenti; (iii) riqualificazione o sostituzione delle finestre esistenti; (iv) installazione di ventilazione meccanica controllata. Per l'isolamento termico delle pareti esterne sono stati selezionati materiali reversibili, compatibili con l'edificio storico e dotati di prestazioni isolanti diverse (lana di roccia  $\lambda=0.038$  W/mK; sughero espanso  $\lambda=0.043$  W/mK, calcio silicato  $\lambda=0.076$  W/mK), con uno spessore compreso tra 0.10-0.20 m. Per l'isolamento interno sono stati selezionati materiali naturali (lana di roccia  $\lambda=0.038$  W/mK; sughero espanso  $\lambda=0.043$  W/mK) e artificiali (aerogel  $\lambda=0.013$  W/mK; isolamento a capillarità attiva  $\lambda=0.031$  W/mK; calcio silicato  $\lambda=0.076$  W/mK), con uno spessore compreso tra 0.03-0.10 m. Per l'isolamento della copertura, sono stati considerati la lana di roccia e il sughero espanso per esterno ( $s = 0.2$  m) e per l'interno ( $s = 0.10$  m). Gli interventi sulle aperture hanno riguardato la sostituzione dei vetri esistenti con vetrazioni basso-emissive ( $U_g=2.126$ ;  $\tau_v=0.81$ ;  $g=0.79$ ) e la sostituzione delle finestre con tripli vetri ( $U_g=0.57$ ;  $\tau_v =0.68$ ;  $g=0.56$ ). In entrambi i casi, è stata migliorata la tenuta all'aria dei serramenti (0.3 ricambi d'aria orari). Per capire se il comfort potesse essere raggiunto anche senza ventilazione artificiale, sono state ottimizzate la velocità dei ricambi d'aria e la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno che faceva innescare la ventilazione naturale tramite l'apertura delle finestre. I tassi di cambio aria variava da 0,5 a 10 h<sup>-1</sup> e la differenza di temperatura da 1 a 5 K.

I punteggi generali definiti dal gruppo di lavoro multidisciplinare per definire l'impatto visivo, fisico e spaziale per ogni componente sono stati poi valutati dai conservatori sul caso studio specifico. In questo modo si è ottenuto il valore finale dell'impatto conservativo di ogni intervento. I risultati hanno evidenziato due gruppi di soluzioni principali. Da un lato gli interventi che non prevedono un miglioramento della tenuta all'aria presentano alti consumi energetici e bassi livelli di comfort, ma anche un'ottimale conservazione del patrimonio. In queste soluzioni i consumi di riscaldamento e raffrescamento sono compresi tra 130-150 kWh/m<sup>2</sup>anno, il PMV medio per tutto l'anno calcolato secondo il modello di Fanger è maggiore di 0.63 (PPD pari a 10%, isolamento dei vestiti pari a 1 nei mesi invernali e 0.5 nei mesi estivi) e la conservazione raggiunge il massimo punteggio (24 punti). Dall'altro, le soluzioni che migliorano la tenuta all'aria hanno minori consumi energetici e un miglior comfort, ma anche un elevato impatto conservativo. I consumi energetici sono infatti tra 19-46 kWh/ m<sup>2</sup>anno, il PMV tra 0.46-0.68 e la conservazione tra 13-21 punti. Altri interventi, come l'isolamento termico e l'installazione di VMC hanno un impatto ridotto. Entrando più nello specifico, se vengono applicati 20 cm di lana di roccia sull'esterno solo su pareti senza valore storico, il fabbisogno energetico risulta 40 kWh/ m<sup>2</sup>anno e il PMV 0.52. Isolando invece sia le pareti esterne che il tetto dall'interno con 3 cm di materiale isolante capillarmente attivo il fabbisogno aumenta di circa 5 kWh/ m<sup>2</sup>anno rispetto all'isolamento esterno, raggiun-

gendo un PMV di 0.58 e un punteggio di conservazione di 21. Per quanto riguarda il comfort, non è necessario avere un impianto di raffrescamento se si garantisce una ventilazione ibrida (senza scambio di calore ma con convezione forzata) tra i 7 e i 10 ricambi orari (Caprioli, 2014). Inoltre, poco cambia in termini di risparmio energetico e comfort se vengono sostituite tutte le finestre o solo i vetri. Questo significa che altri fattori come le infiltrazioni sono molto più importanti.

## **CONCLUSIONI**

La metodologia proposta definisce una procedura per selezionare gli interventi di risanamento conservativo più convenienti dal punto di vista dell'efficienza energetica, del comfort ambientale e della riduzione degli impatti conservativi su un edificio storico. Si è dimostrata l'importanza della diagnosi storica, funzionale ed energetica di tipo strumentale per costruire un modello termodinamico aderente alle condizioni reali dell'edificio, oltre che del monitoraggio ambientale per calibrare la simulazione in base ai dati reali. Il modello calibrato costruito sulla base di queste informazioni può essere poi utilizzato per effettuare un'analisi multi-obiettivo che consente di individuare le soluzioni di retrofit ottimali per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico.

## **BIBLIOGRAFIA**

- AICARR (Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione). 2013. Efficienza energetica negli edifici storici. Milano: AICARR.
- ASHRAE. 2006. Green Guide. The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings. Burlington: BH Elsevier.
- Boriani M., Giamb Bruno M., Garzulino A. 2011. Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio. Roma: ENEA.
- Bundesdenkmalamt. 2011. Richtlinie: Energieeffizienz am Baudenkmal. Wien: Bundesdenkmalamt Hofburg.
- Changeworks. 2008. Energy Heritage. A Guide to Improving Energy Efficiency in Traditional and Historic Buildings. Edinburgh: Changeworks.
- Capehart B.L., Turner W.C., Kennedy W.J. 2003. Guide to Energy Management. 4<sup>th</sup> Edition. Lilburn: The Fairmont Press.
- Caprioli T. 2014. Simulation models for Cooling load reduction by ventilation strategies. Case study: the public Weigh house in Bolzano, Master thesis at the Technische Universität Dresden.
- Chantrelle F.P., Lahmidi H., Keilholz W., El Mankibib M., Michel P. 2011. Development of a Multicriteria Tool for Optimizing the Renovation of Buildings. Applied Energy. 88, 1386–1394.
- Centre for Renewable Energy Sources (CRES). 2000. Energy Audit Guide. Athens: CRES.
- Currie J., Williamson J.B., Stinson J. 2013. Monitoring of thermal upgrades of ten traditional properties. Glasgow: Historic Scotland.

- Dall'O' G., Speccher A., Bruni E. 2012. The Green Energy Audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the LEED Protocols. *Sustainable Cities and Society*, 3, 54-65.
- Dall'O', G. 2011. Green energy audit, Manuale operativo per la diagnosi energetica ed ambientale degli edifici. Milano: Edizioni Ambiente.
- Deb K. Pratap A., Agarwal S., T. Meyarivan. 2002. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Trans.* 182-197.
- English Heritage (EH). 2008. Energy Conservation in Traditional Buildings. London: EH.
- English Heritage (EH). 2010. Energy Efficiency and Historic Buildings. London: EH.
- Energy Efficiency Office (EEO). 2007. Guidelines on Energy Audit. Honk Kong: EEO.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1998. Energy Star Buildings Manual. The Action Plan for Energy Star Buildings Success. New York: EPA.
- Eriksson P., Hermann C., Hrabovszky-Horváth S., Rodwell D. 2014. EFFESUS methodology for assessing the impacts of energy- related retrofit measures on heritage significance, in Kalliopi F. & Cassar M. *The Historic Environment: Policy & Practice: Energy Efficiency and Heritage Values in Historic Buildings*. pp. 132–139.
- Green Building Council (GBC). 2014. Protocollo di certificazione volontaria GBC Historic Building. Rovereto: GBC Italia.
- Grunewald J., Will T., Pohl M. 2010. Pilotstudie zum Modellprojekt des Sächsischen Staatsministeriums des Innern. Dresden: Energetische Sanierung von Bau- denkmalen.
- Hamdy M., Hasan A., Siren K. 2011. Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings, *Building and Environment* 46, 109-123.
- Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). 2000. Lighting Handbook. New York: IESNA.
- Kreith F., Goswami Y.D. 2007. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Boca Raton: CRC Press.
- Kreith F., Goswami Y.D. 2008. Energy Management and Conservation Handbook. Boca Raton: CRC Press.
- Lucchi E. 2012, Diagnosi energetica strumentale degli edifici. Palermo: Dario Flaccovio.
- Lucchi E., Pracchi V. 2013. Efficienza energetica e patrimonio costruito. Sant'Arcangelo di Romagna: Maggioli Editore.
- Metadistretto Veneto dei Beni Culturali (MVBC). 2011. La qualità delle prestazioni energetico-ambientali nella manutenzione dell'architettura storica. Venezia: MVBC.
- Roberti F., Exner D., Filippi Oberegger U., Gasparella A. 2014. Energy diagnosis of a historic building and building simulation, AICARR 49° Convegno Internazionale, Roma
- Roberti F, Filippi Oberegger U., Lucchi E., Gasparella A. 2015. Energy retrofit and conservation of built heritage using multi-objective optimization: demonstration on a medieval building, 2<sup>nd</sup> IBPSA-Italy Conference, Free University of Bolzano, 4-6 February 2015.

- The Society for the Protection of Ancient Buildings (SPAB). 2014. Energy Efficiency in Old Buildings, London: SPAB.
- Thumann A., Younger W.J. 2008. Handbook of Energy Audits. Lilburn: The Fairmont Press.
- Troi A., Bastian Z. 2014. Energy Efficiency Solutions for Historic Buildings. A Handbook, Zurigo: Birkhäuser.
- Turner W.C., Doty S. 2007. Energy Management Handbook. Lilburn: The Fairmont Press.
- Wulfinghoff D.R. 1999. Energy Efficiency Manual. Wheaton: Energy Institute Press.

### *Legislazione di riferimento*

- Commissione Europea. 2002. Direttiva 2002/91/EC del Parlamento Europeo e del Consiglio della prestazione energetica degli edifici.
- Commissione Europea. 2006. Direttiva 2006/32/CE concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici.
- Commissione Europea. 2010. Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- Commissione Europea. 2012. Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE, 25 ottobre 2012.
- D.Lgs. 192/2005 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia".
- D.Lgs. 311/2006 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia".
- D.Lgs. 115/2008 "Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE".
- D.Lgs. 115/2008 "Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE".
- DPR 59/2009 "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia".
- DM 26/6/2009 "Linee guida certificazione energetica degli edifici".
- D.Lgs. 63/2013 "Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale".
- D.Lgs. 102/2014 "Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE".
- Decreto interministeriale 26/6/2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici".
- Decreto interministeriale 26 giugno 2015 "Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".

*Norme*

- CEN/TC 346. 2009-2014. Conservation of Cultural Heritage. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 15758. 2010. Conservation of Cultural Property. Procedures and Instruments for Measuring Temperatures of the Air and the Surfaces of Objects. Brussels: European Committee for Standardization.
- ISO 6781. 1983. Thermal insulation. Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes. Infrared Method. Brussels: European Committee for Standardization.
- ISO 9869. 1994. Thermal Insulation. Building Elements. In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Brussels: European Committee for Standardization.
- ISO 9972. 2006. Thermal performance of buildings. Determination of Air Permeability of Buildings. Fan Pressurization Method. Brussels: European Committee for Standardization.
- UNI TS 11300. 2014. Prestazioni energetiche degli edifici (Parte 1 e 2). Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- UNI CEI EN 16247. 2012. Diagnosi energetiche. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.