



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA"

CICLO XXV

COORDINATORE Prof. ROBERTO DI GIULIO

Valutazione del comportamento energetico dell'architettura storica.
Analisi dei metodi di calcolo dello stato di fatto energetico e proposte correttive

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/12

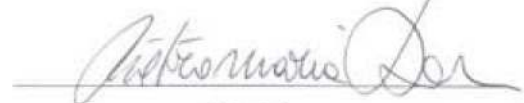
Dottorando

Dott. Marta Calzolari


(firma)

Tutore

Prof. Pietromaria Davoli


(firma)

Anni 2010/2012



*A Olly,
per tutto*

	Indice
Abstract in italiano	11
Abstract in English	13
PARTE I - INTRODUZIONE	15
Capitolo 1. Presentazione della ricerca	17
1.1. Inquadramento del problema scientifico	17
1.2. Obiettivi della ricerca	17
1.3. Limitazioni del campo di indagine	19
1.3.1. Edilizia storica	19
1.3.2. Edilizia storica specialistica	20
1.3.3. Valutazione energetica	24
1.4. Risultati attesi	25
1.5. Destinatari della ricerca	26
1.6. Il metodo e le fasi della ricerca	26
1.7. Collocamento dell'argomento di ricerca nel settore della tecnologia dell'architettura	28
1.8. Struttura della tesi	28
Capitolo 2. Motivazioni della ricerca	31
2.1. Incidenza dell'edilizia storica sul patrimonio edilizio italiano	31
2.2. Motivazioni per la ricerca nel campo della riqualificazione energetica del patrimonio storico	35
2.3. Excursus normativo	41
2.4. Vincoli e deroghe	46
PARTE II - STATO DELL'ARTE E DELLE CONOSCENZE SUL TEMA DELLA EFFICIENZA ENERGETICA DEL PATRIMONIO STORICO	53
Capitolo 3. Esperienze e studi per la riqualificazione energetica del patrimonio storico	55
3.1. Repertorio di progetti di riqualificazione energetica di edifici storici	55
- <i>Castel Flavon, Bolzano, 2001-2002</i>	57
- <i>Casa in via Vanga, Bolzano, 2002</i>	58
- <i>Casa Aichner, Chiusa, 2006</i>	59

-	<i>Ex edificio postale, Bolzano, 2006</i>	60
-	<i>Spechtenhauser, Lasa, 2006</i>	61
-	<i>Zeughaus - Deutsches Historisches Museum, Berlino 2006</i>	62
-	<i>Casa Glauber, Bolzano, 2007</i>	63
-	<i>Maso Huber, Rodengo, 2008</i>	64
-	<i>Maso Oberegger, Anterselva, 2008</i>	65
-	<i>Monastero di Sant'Antonio, Ferrara, 2008</i>	66
-	<i>Restauro scientifico dell'ex monastero Cistercense, Faenza, 2008</i>	68
-	<i>Sito museale Antiquarium, Alessandria, 2009</i>	69
-	<i>Edificio Liberty, Padova, 2010</i>	70
-	<i>Casa 37, Laudes, 2010</i>	71
-	<i>Edificio residenziale, Glorenza, 2010</i>	72
-	<i>Edificio residenziale a Francolino, Ferrara, 2010</i>	73
3.2.	Valutazione critica dei progetti	74
3.2.1.	Analisi degli interventi di riqualificazione energetica presentati nelle schede	74
3.2.2.	Intervento sull'involucro come sistema di riqualificazione energetica dell'edificio storico	77
3.2.3.	Integrazione del sistema impiantistico nel contenitore storico	83
Capitolo 4. Ricerche nazionali orientate alla definizione di linee guida e buone pratiche per il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico		91
4.1.	Ricerche	91
-	<i>Progetto A.T.T.E.S.S. - Elaborazione di linee guida per la riqualificazione energetica del patrimonio storico</i>	92
-	<i>Linee guida sull'uso efficiente dell'energia nel patrimonio storico - Studio promosso dal Ministero dei Beni e delle Attività Culturali</i>	93
-	<i>Sostenibilità energetica dei centri storici, Politecnico di Bari</i>	95
-	<i>Workshop interuniversitario</i>	98
-	<i>Retrofit energetico ed edificato storico (Università di Pescara)</i>	99
-	<i>Borgo_Clima. Un percorso di riqualificazione energetico - ambientale del tessuto storico (Università di Ferrara)</i>	100
-	<i>Ricerche Università degli studi di Ferrara – Centro Architettura>Energia</i>	107

-	<i>Studio integrato per il borgo storico di Apice Vecchia (Benevento)</i>	107
-	<i>Risparmiare il passato: Il progetto per il quartiere Barca a Bologna</i>	112
-	<i>Ricerca Università degli studi di Ferrara – Centro Labora, Miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia storica</i>	116
-	<i>Protocollo GBC Italia Edifici storici</i>	117
4.2.	Valutazioni critiche	118
4.2.1.	Analisi dei principali risultati delle ricerche documentate	118
4.2.2.	Elaborazione di un quadro sinottico delle principali fasi del processo di intervento di per la riqualificazione energetica e ambientale di un edificio storico	120
Capitolo 5. Ricerche nazionali orientate alla valutazione del metodo di calcolo del comportamento energetico allo stato di fatto		123
5.1.	Ricerche	123
-	<i>3ENCULT – Energia Efficiente per il Patrimonio Culturale Europeo;</i>	123
-	<i>Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici storici - Politecnico di Milano Dipartimento BEST)</i>	124
-	<i>Energia e insediamento. Una ricerca interdisciplinare per l'applicazione di principi di efficienza energetica nei centri storici - Facoltà di Architettura di Sassari</i>	126
5.2.	Valutazioni critiche	128
Capitolo 6. Ricerche internazionali		131
6.1.	Ricerche sulla definizione di linee guida e buone pratiche	131
-	<i>USA - Making your historic building energy efficiency</i>	132
-	<i>Estonia – HEALTH (Healthy and Energy-efficient Living in Traditional Rural Houses Technical survey of Estonian houses)</i>	134
-	<i>Regno Unito (UK) – Energy Heritage</i>	136
-	<i>Regno Unito (UK) – Renewable Heritage</i>	138
-	<i>Regno Unito (UK - Energy Efficiency Historic Homes – Case studies</i>	140
-	<i>SECHURBA - Sustainable energy communities in historic urban areas</i>	140
6.2.	Ricerche sulla valutazione dello stato di fatto	144
-	<i>Regno Unito (UK) - Energy modelling analysis of a traditionally built Scottish tenement flat</i>	144
-	<i>Regno Unito (UK) - U-Values and traditional buildings</i>	146

- Paesi Scandinavi - EEPOCH	151
6.3. Valutazioni critiche	153

PARTE III - VALUTAZIONE DEL METODO DI CALCOLO SECONDO NORMATIVA E INDICAZIONI PER L'ADEGUAMENTO AL CASO DELL'EDILIZIA STORICA	155
--	------------

Capitolo 7. Metodi di calcolo del comportamento energetico	157
7.1. Descrizione dei metodi di calcolo riconosciuti	157
7.2. Confronto tra i metodi di calcolo delle prestazioni energetiche nell'edilizia sociale	161
7.3. Confronto tra i metodi di calcolo delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica	163
7.3.1. Simulazioni in regime mediamente stazionario dei casi studio	163
- Palazzo Scacerni Sisti – Ferrara	165
- Sant'Antonio in Polesine – Ferrara	171
- Palazzo Cicognara Sani – Ferrara	176
- Villa Molin Avezzù – Fratta Polesine (Rovigo)	180
- Villa Barbaro Maser – Maser (Treviso)	184
7.3.2. Risultati delle simulazioni	188
7.4. Limitazione del campo di indagine: definizioni e motivazioni	191
7.5. Valutazione dei metodi di calcolo semplificati.	198
7.5.1. Impostazione dell'analisi	198
7.5.2. Caratterizzazione tipologica dell'edificio	200
7.5.3. Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione termica dei componenti di involucro - componente opaca	204
7.5.4. Caratterizzazione termica dei componenti di involucro - componente trasparente	217
7.5.5. Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione degli scambi termici	221
7.5.6. Conclusioni dell'analisi dei metodi di calcolo semplificati	236
7.6. Simulazione energetica in regime dinamico dei casi studio	244
7.7 Valutazione del metodo di calcolo standardizzato	250
7.7.1 Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione termica dei componenti di involucro	252

7.7.2 Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione degli scambi termici;	258
7.7.3 Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione	260
7.7.4. Conclusioni dell'analisi del metodo di calcolo standardizzato	261
Capitolo 8. Sperimentazione: rilievo energetico strumentale	263
8.1. Calcolo del comportamento energetico reale dello stato di fatto di un edificio	263
8.1.1. <i>Obiettivo della sperimentazione: Diagnosis of a Real Housing Envelope (DRHousE)</i>	264
8.2. Esperienza presso la <i>Nottingham University – Departement of Built Environment: Co-heating test.</i>	265
8.3. <i>Setup</i> sperimentale	270
8.4. Tecniche di misura: test sui modelli di studio	277
8.4.1. Curva di riscaldamento – Modello A	277
8.4.2. Curva di riscaldamento – Modello B	278
8.4.3. Tecnica di misura con ΔT costante – Modello B	281
8.4.4. Curva di inseguimento – Modello A	282
8.4.5. Curva di inseguimento – Modello B	287
8.5. Conclusioni della sperimentazione	294
PARTE IV – CONCLUSIONI	295
9. Considerazioni conclusive e sviluppi futuri	297
9.1. Risultati dello studio dello stato dell'arte	297
9.2. I metodi di calcolo semplificati	298
9.2.1. Proposte per l'affinamento del metodo semplificato <i>Docet</i>	299
9.2.2. Proposte per l'affinamento del metodo semplificato <i>UNI TS 11300</i>	301
9.3. Il metodo di calcolo analitico standardizzato	302
Bibliografia ragionata	307
Appendice A. Normative regionali	317
Appendice B. Casi studio della ricerca <i>Energy Efficiency Historic Homes</i>, Regno Unito (UK)	325
Appendice C. Tecniche di misura del coefficiente globale di scambio termico in edifici storici	331

Il progetto di riqualificazione energetica di un edificio storico deve essere impostato partendo dalla valutazione preliminare delle sue potenzialità energetiche e delle sue prestazioni, per poter calibrare gli interventi in modo da rispondere correttamente alle esigenze energetiche in base alle sue caratteristiche, senza perderne o pregiudicarne il valore testimoniale.

Questo approccio verso l'architettura storica è piuttosto recente, pertanto non sono ancora state sviluppate normative di settore specifiche. Tale mancanza fa sì che non sia stato ancora affiancato alla definizione di buone pratiche di intervento, un corpo metodologico specifico per il calcolo della prestazione energetica degli edifici storici allo stato di fatto. Per determinare tale valore, su cui si basa l'intero progetto di intervento, si fa riferimento agli strumenti di calcolo sviluppati per l'edilizia non storicizzata.

La presente ricerca prende avvio dall'ipotesi che le due tipologie di calcolo oggi disponibili (metodo analitico standardizzato e metodi semplificati) presentino alcuni limiti di applicazione per la valutazione dell'architettura storica, le cui caratteristiche tecnologiche, di geometria costruttiva e architettoniche si differenziano molto più sensibilmente dall'edilizia recente, rispetto ai fabbricati che costituiscono il tessuto aggregativo di base.

L'uso di strumenti non specifici può portare a commettere un errore significativo nel calcolo della prestazione energetica residua dei fabbricati, sottostimando o sovrastimando tale valore. Questo errore può, di conseguenza, condurre a scelte di intervento che possono pregiudicare la salvaguardia dell'edificio stesso, il comfort al suo interno e il risparmio di risorse energetiche.

Lo studio analizza criticamente gli attuali metodi di calcolo energetico con l'obiettivo di verificarne validità e limiti di applicazione testandoli su casi studio selezionati tra edifici storici campione.

L'analisi evidenzia scostamenti significativi tra il risultato ottenuto con il metodo analitico, preso come riferimento, e quelli dei sistemi di calcolo semplificati, e indica la necessità di trattare il tema della valutazione della prestazione energetica dell'architettura storica in modo differente da quella dell'edilizia recente. Parallelamente, l'applicazione dei diversi metodi di calcolo ai casi studio evidenzia anche l'intrinseca difficoltà di reperire, per i fabbricati costruiti nel passato, i dati necessari all'applicazione corretta del metodo analitico standardizzato, prima considerato come l'unico dato affidabile.

Quanto verificato spinge a sviluppare proposte di affinamento dei metodi semplificati per renderli adatti al

calcolo delle prestazioni energetiche dell'edilizia storica e alla sperimentazione di un nuovo metodo di rilievo energetico strumentale, appositamente definito per edifici antichi, che possa essere utilizzato parallelamente al calcolo analitico.

Parole chiave della ricerca

Riqualificazione energetica, architettura storica, stato di fatto energetico, metodo di calcolo della prestazione energetica.

Abstract in English

A project of energetic redevelopment of a historic building starts from the preliminary assessment of its energy potential and residual performance, in order to tailor interventions and properly address the energy needs according to the characteristics of the building, without losing or jeopardizing its heritage and historic value.

This approach is relatively new and specific industry regulations have not yet been developed. The absence of specific legislation means that a dedicated methodology for calculating the energy performance of historic buildings is not included in the best practices of intervention. Currently the energy performance of historic buildings, on which the whole intervention project is based, is calculated with the same tools developed for modern buildings.

This research starts from the hypothesis that the two types of calculation available today (analytical standardized method and simplified method) present some limits of applicability, in particular if used for the evaluation of historical architecture, which has technical, geometric, and architectural characteristics that differ significantly from the ones of newer buildings. The use of non-specific instruments can lead to errors in the calculation of the residual energetic performance of buildings. This calculation error can consequently lead to choices of intervention that can be harmful to the conservation of the building, to final level of comfort of its interior, or to its resulting energy efficiency.

This study, therefore, critically analyzes the current methods of calculating energy efficiency, with the aim of verifying their validity and limits of applicability by testing them on a sample of historic buildings.

This analysis shows significant differences between the results obtained by the analytical method, taken as reference, and the calculations made with the simplified system. It identifies the need for evaluating the energy performance of historic architecture in a different way from that used for recent buildings.

At the same time, the application of different methods of calculation to the case studies also highlights the inherent difficulty of finding, for buildings constructed in the past, the necessary data for correctly applying the standard analytical method, regarded so far as the only reliable system.

These findings call for the refinement of the simplified method, more suitable to the calculation of the energy performance of historic buildings, and the development of a new instrumental method for the measurement of the energy characteristics of historic buildings, which can be used in parallel with the analytical calculation.

Keywords

Energy retrofit, historical architecture, residual energy performance, energy performance calculation

Parte I
Introduzione

Capitolo 1. Presentazione della ricerca

1.1. Inquadramento del problema scientifico

L'attività di ricerca ha come oggetto specifico il campo della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio con valore storico e testimoniale, con particolare riferimento all'edilizia monumentale (nell'accezione di distinzione dall'edilizia di base o cosiddetta "minore", come pure da quella residenziale). I tratti distintivi di questa tipologia consistono nel fatto che su di essa non sono possibili, ad oggi, generalizzazioni sia in termini di definizione dello stato di fatto energetico, sia per quanto riguarda l'individuazione di linee guida per la riqualificazione. Gli edifici storici specialistici generalmente non costituiscono parte del tessuto aggregativo urbano ma si distinguono, ergendosi spesso liberi sui quattro lati, nel lotto di pertinenza. Non è sufficiente, nella progettazione dell'intervento di riqualificazione, ricercare una mediazione con la normativa di riferimento dell'edilizia esistente non storicizzata, perché essa riconduce il metodo di calcolo ad uno *stock* edilizio per lo più con destinazione residenziale. Questo presuppone un'analisi preliminare dei fabbricati diversa da quella prevista per il resto del tessuto edilizio esistente storicizzato e non, che parta dalla conoscenza quanto più corretta del comportamento energetico e ambientale di tali fabbricati. La previsione di una futura normativa di settore deve spingere verso un approccio differente che parta dalla precisa definizione dello stato di fatto (energetico) dell'edificio prima ancora che dalle linee guida per un intervento di riqualificazione.

L'esigenza sempre più frequente di rifunzionalizzare questa parte del patrimonio edilizio esistente, soprattutto nello scenario italiano che risulta particolarmente rilevante in termini di diffusione sul territorio, spinge il settore delle costruzioni a indagare sul comportamento energetico dei fabbricati antichi, nell'ottica di intervenire su di essi con un approccio adeguato e differente rispetto a quello utilizzato per il costruito di più recente edificazione, per individuare soluzioni appropriate per una riqualificazione energetica conservativa. Una valutazione corretta del comportamento energetico dei fabbricati permette, infatti, di progettare interventi di riqualificazione maggiormente mirati e soprattutto realmente necessari per migliorare il *comfort* interno agli ambienti in essi contenuti.

1.2. Obiettivi della ricerca

Vista la possibilità di indagare l'edilizia storica soltanto attraverso gli strumenti di calcolo sviluppati per edifici nuovi o comunque di recente costruzione oggi a disposizione del progettista, la tesi parte dall'analisi di questi strumenti per verificarne la validità e i limiti di applicazione al caso studio antico. In particolare, tali strumenti sono classificabili secondo due categorie, i metodi di calcolo *analitici*, che richiedono di descrivere correttamente tutte le caratteristiche geometriche e termiche dei fabbricati, e i metodi

semplificati, che permettono di facilitare alcuni passaggi del calcolo ricorrendo ad alcune soluzioni tecnologiche pre-calcolate per componenti *standard*.

Pertanto, **la prima ipotesi da cui ha preso avvio lo studio** è che, per gli edifici storici, esista uno scostamento tra il risultato di prestazione energetica ottenuto con il metodo analitico standardizzato derivante dalla normativa di settore per l'edilizia non storicizzata e i metodi semplificati riconosciuti dal Comitato Termotecnico Italiano¹.

Per verificare questa prima ipotesi è necessario:

1. Analizzare passo passo l'utilizzo degli strumenti semplificati per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici storici per definirne i limiti di applicabilità a questa tipologia edilizia specifica;
2. Quantificare lo scostamento tra i risultati ottenuti con i due diversi metodi di calcolo;
3. In caso di scostamenti significativi, proporre gli aggiustamenti necessari per l'uso degli strumenti di calcolo semplificati per la verifica delle prestazioni energetiche degli edifici storici.

Una volta verificata la possibilità o meno di ricorrere ai metodi di calcolo semplificati, con gli opportuni correttivi individuati, per la stima energetica degli edifici storici, si valuta la possibilità di utilizzare correttamente anche il metodo analitico, formulando una **seconda ipotesi alla base dello studio**: l'applicazione all'edilizia storica del metodo analitico standardizzato di calcolo delle prestazioni energetiche presenta dei limiti, derivanti dalla impossibilità di conoscere tutti i dati di *input* richiesti, necessari a compiere un calcolo attendibile.

Pertanto, per verificare questa seconda ipotesi è necessario:

1. verificare l'utilizzo dello strumento di calcolo analitico standardizzato per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici storici per definirne i limiti di applicabilità a questa tipologia edilizia specifica;
2. individuare i dati, richiesti dal metodo di calcolo, più difficili da definire con esattezza nel caso dell'edilizia storica;
3. proporre soluzioni alternative, per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici storici con metodo standardizzato.

¹ Il metodo analitico è definito dal Decreto Legislativo 192/2005 e 311/2006 e dal corpo metodologico UNITS 11300 [1-2-3].

1.3. Limitazioni del campo di indagine

Il lavoro si concentra sull'analisi degli strumenti di calcolo delle prestazioni energetiche dell'architettura antica, con particolare riferimento all'edilizia monumentale.

Inoltre, all'interno del progetto di riqualificazione energetica, l'attenzione è posta soltanto alla fase preliminare di indagine dello stato di fatto, intesa come momento decisivo nel processo decisionale delle scelte future di intervento.

Pertanto, la limitazione di campo necessaria a inquadrare gli obiettivi del presente studio deve necessariamente svilupparsi su vari livelli, attraverso la definizione di alcuni concetti chiave della tesi stessa.

Nel testo si fa riferimento a concetti quali *edilizia storica*, *edilizia storica specialistica o monumentale* e *valutazione energetica*, che vengono di seguito descritti in funzione dell'uso specifico di questo studio.

1.3.1. Edilizia storica

“Quando uno si fa la casa con le sue mani, la fa come uno si fa una casa in quel particolare momento nella sua area culturale, comprendendo immediatamente e sinteticamente quel che più conviene a formare un prodotto edilizio, agendo quindi in piena coscienza spontanea²”.

Secondo la precedente descrizione di Caniggia e Maffei, l'edilizia storica è il risultato di un *fare architettura* attraverso ciò che il periodo storico e l'esperienza trasmettono e che contraddistinguono la cultura di quel particolare architetto o momento storico. Secondo tale affermazione, si può definire edilizia storica il processo edilizio che porta alla realizzazione dell'architettura spontanea e possiamo considerare come tecnologie e materiali tipici dell'architettura antica tutti i prodotti che entrano all'interno di questo processo. Generalmente questo particolare periodo si fa corrispondere all'era *pre-industriale*, quella cioè, caratterizzata da un processo edilizio fondato su tecniche, materiali e tecnologie tradizionali, locali, strettamente radicate in un luogo o in una particolare cultura.

All'opposto, invece, nel momento in cui *“la complessità del processo allontana a tal punto gli attori da renderli incapaci di riconoscersi in un orizzonte organico di obiettivi, siamo in piena coscienza critica. Possiamo definire industriali le tipologie di processo più o meno convenzionali, come le tecnologie ed i materiali propri di questa fase³”*.

Edilizia storica quindi è,

² Caniggia G, Maffei G.L., *Lettura dell'edilizia di base*, Saggi Marsilio, Venezia, 1979, p. 41.

³ Sinopoli N., *La tecnologia invisibile. Il processo di produzione dell'architettura e le sue regie*, Franco Angeli, Milano 1997, p. 35.

“il prodotto di un processo edilizio che si caratterizza per l’interazione di fasi, operazioni ed operatori frutto di una prassi non formalizzata⁴”.

La legislazione nazionale di tutela dei beni culturali (decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42) afferma che non siano considerabili oggetto di conservazione e salvaguardia le opere “di autore vivente o la cui esecuzione non risalga ad oltre cinquanta anni”. Il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio aiuta ad affiancare un limite cronologico alle definizioni basate sull’analisi tipologica e tecnologica delle architetture del passato. Pertanto, possiamo considerare *edilizia storica* il prodotto di un processo basato su una coscienza spontanea, frutto di un lavoro risalente ad almeno cinquanta anni fa.

La tesi di dottorato qui presentata si concentra sullo studio dell’architettura del passato perché si basa sulla convinzione che manchi ancora un approccio specifico in riferimento al tema della riqualificazione energetica e ambientale del patrimonio storico. Molto è stato studiato sull’argomento per gli edifici di nuova progettazione e di recente costruzione, mentre ancora non esiste uno stato dell’arte strutturato per l’edilizia storica.

1.3.2. Edilizia storica specialistica

Un’ulteriore specificazione del patrimonio storico è utile, in particolare, per quanto riguarda la scelta dei casi studio da analizzare nella presente ricerca. Gli argomenti da affrontare, le ragioni che hanno mosso lo studio e i risultati che si intendono raggiungere sono validi ed estendibili a tutto il patrimonio storico, ma risultano più evidenti e significativi per quanto riguarda il patrimonio storico *specialistico*.

Il patrimonio storico è costituito principalmente da edilizia di base e da edilizia specialistica; il settore dell’edilizia di base si riferisce ad una tipologia a destinazione prevalentemente residenziale, che costituisce la parte preponderante del tessuto storico dei centri abitati; l’edilizia specialistica, invece, rappresenta un caso a parte perché rappresenta un *tipo* edilizio ed è maggiormente autonoma rispetto alle regole che governano l’aggregato⁵.

⁴ Ambrogio K., *Definizione dei fattori determinanti il comportamento energetico e delle potenzialità di intervento nel centro urbano di Ferrara*, Tesi di dottorato di ricerca XXIII ciclo, anno 2011, Università degli studi di Ferrara, p. 25.

⁵ *Edifici specialistici* (chiese, conventi, palazzi gentilizi, ecc...) sono quelli “di norma destinati ad un uso non residenziale familiare, con elevato grado di specializzazione” (Caniggia G, Maffei G.L., *op. cit. p. 106*), mentre *l’edilizia di base* è quella “atta alla residenza di una o più famiglie [...]”. Carattere essenziale è una costante minor incidenza di personalizzazione del prodotto edilizio; all’opposto gli edifici specialistici sono tanto personalizzati da esserne spesso noto l’autore, il committente, l’autore, la famiglia che li ha abitati [...]. Carattere ineluttabile dell’edificio specialistico è l’essere condizionato pur sempre da un “tipo” specifico: ovviamente non più “concetto di casa” ma concetto di ospedale, convento, scuola, palazzo nobile, ecc. [...] Più l’edificio è specializzato più è personalizzato da mediazioni interposte tra edificazione e fruizione”. (Caniggia G, Maffei G.L., *op. cit., p. 111*).

Per fare questa distinzione è utile anche considerare il contesto ambientale (antropizzato o naturale) entro cui si inserisce l'edificio. In base a questo, è possibile individuare tre ambiti di riferimento, riassunti in *Tabella 1.1*.

	ISOLATO	DIFFUSO
AMBIENTE URBANO	Palazzi, palazzetti, chiese	Edifici caratteristici del centro storico
AMBIENTE PERI - URBANO	Villini con giardino	Edifici caratteristici del tessuto urbano consolidato
AMBIENTE EXTRA - URBANO	Ville, castelli, monasteri	Borghi, insediamenti rurali, corti benedettine

Tabella 1.1. Ambiti di riferimento degli edifici storici. Progetto A.T.T.E.S.S – edilizia storica e sostenibilità ambientale⁶. In rosso è evidenziato l'ambito di riferimento interessato dal presente lavoro.

La tesi si concentra essenzialmente sull'ambito *isolato* (o *quasi isolato*), individuando come oggetti di indagine i palazzi, le ville, i castelli o i monasteri, tutte, cioè, quelle tipologie edilizie, specialistiche, che si ergono di norma nel lotto di pertinenza libere sui tre/quattro lati. Pertanto, unendo le due definizioni (una maggiormente legata alla destinazione d'uso, l'altra all'ambito di riferimento), è possibile identificare con l'espressione edilizia storica *specialistica monumentale* l'oggetto del lavoro, riferendosi ad una tipologia edilizia antica caratterizzata da elementi architettonici e tecnologici che la fanno spiccare nel complesso costituito dal tessuto aggregativo di base.

Distinguere tra edificio *specialistico* e *di base*, pertanto, è utile ai fini del presente lavoro, in particolare per un approccio *energetico* al problema. Le ragioni sono essenzialmente enucleabili come segue:

a) destinazione d'uso.

Per quanto riguarda la certificazione energetica, la normativa italiana (UNI TS 11300)⁷ distingue il metodo di valutazione in base alla destinazione d'uso del fabbricato, per semplificare il calcolo attraverso alcune

⁶ Cfr: Chiovaro S., *Analisi e valutazioni condotte su un edificio storico dell'alta Marca Trevigiana*, in "La qualità delle prestazioni energetico – ambientali nella manutenzione dell'architettura storica, Linee guida", in Progetto A.T.T.E.S.S – Edilizia storica e sostenibilità ambientale, Metadistretto Veneto della Bioedilizia e Metadistretto Veneto dei beni culturali, 2008

⁷ Per una trattazione più approfondita della normativa di riferimento in materia di efficienza energetica e certificazione si rimanda al capitolo 2.4

specifiche approssimazioni⁸. Una delle più significative in tal senso consiste nel diverso rapporto tra superficie e volume riscaldato assegnato alle diverse tipologie. Nell'edilizia residenziale, l'altezza interpiano viene considerata pari a 2.70 m, mentre si fanno maggiori distinzioni nel caso del terziario. Per l'architettura storica fare questa distinzione non è così immediato. Le diversità geometriche e morfologiche che caratterizzano le due macro tipologie non sono date dall'uso dell'edificio ma piuttosto derivano da un diverso livello di personalizzazione, nonché dal livello di importanza e di "rappresentatività" del fabbricato. Pertanto, gli edifici storici specialistici (più dell'edilizia di base, per la quale le supposizioni della normativa si discostano meno dal reale comportamento) hanno tradizionalmente un'altezza interna interpiano maggiore rispetto alla gran parte di quella di edifici recenti, sia che si tratti di costruzioni destinate ad un uso residenziale sia ad un utilizzo diverso. Per questo, la distinzione non dipende dalla destinazione d'uso del fabbricato ma da queste caratteristiche distintive tipiche delle emergenze architettoniche.

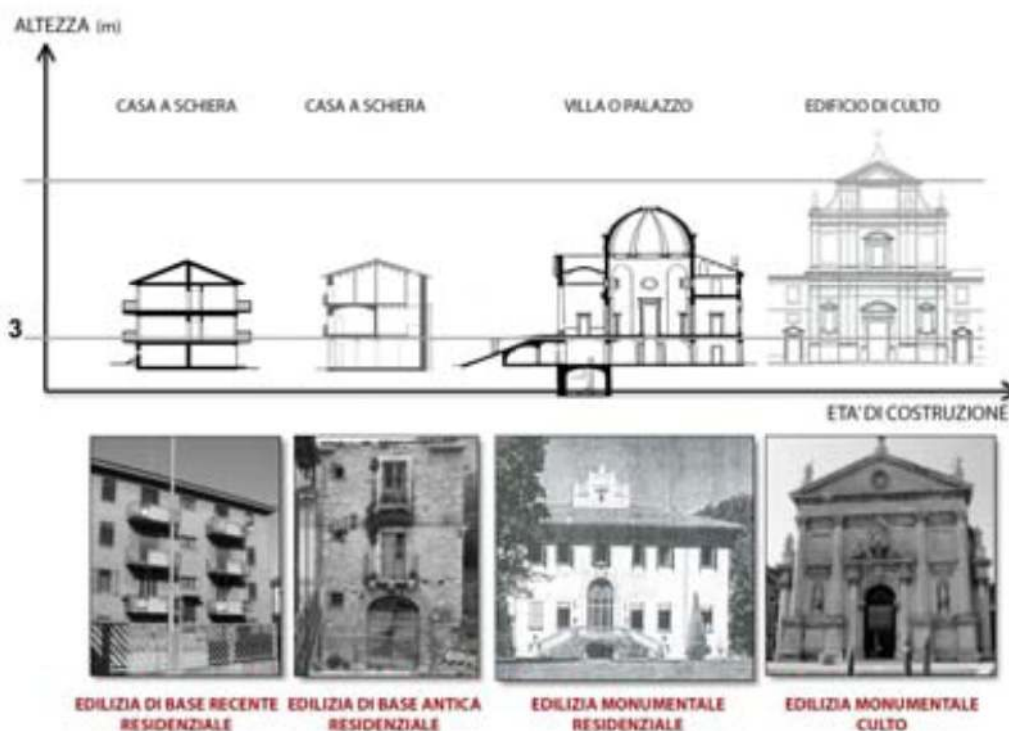


Figura 1.1. Confronto tra alcune tipologie di edificio storico e uno di recente costruzione. Come si evince dal grafico la differenza principale fra edilizia recente e antica non è data dalla destinazione d'uso (nel caso di residenza infatti, solo due volumetrie si assomigliano – altezza interpiano 3m nei primi due esempi, ma non nel terzo) ma è in funzione dell'altezza interna degli ambienti.

⁸ Si veda *capitolo 7* per la trattazione di questo argomento

b) fenomeni transitori complessi.

L'edilizia *specialistica*, rispetto a quella di base, presenta una complessità morfologica che merita valutazioni indipendenti, che tengano conto delle possibili variazioni nel comportamento energetico *standard* date dai volumi molto alti, dalla interazione tra vani adiacenti di altezze diverse, grande inerzia delle chiusure, diverso rapporto di scambi termici tra interno ed esterno, fenomeni transitori più complessi. Una valutazione *standard* del comportamento energetico di questi edifici, fatta secondo simulazioni in regime mediamente stazionario⁹, non permette di considerare l'influenza di questi aspetti nel comportamento globale dell'edificio, rischiando di escludere apporti favorevoli importanti.

c) metabolismo ambientale.

Avendo definito l'edilizia *specialistica* come quella «[...] con elevato grado di specializzazione [...] condizionata pur sempre da un *tipo* specifico [...], personalizzata da mediazioni interposte tra edificazione e fruizione¹⁰», è necessario considerare come tale caratterizzazione *specialistica* possa condizionare anche il comportamento ambientale ed energetico dell'edificio stesso. Gli sforzi economici e il tipo di committenza, oltre che di utilizzo, hanno permesso in passato di destinare a questo *tipo* edilizio maggiore attenzione rispetto a quello normalmente riservato all'edilizia di base, costituente il tessuto aggregativo comune. Questa maggiore attenzione ha portato alla realizzazione di strategie di controllo ambientale paragonabili, in alcuni casi, a veri e propri impianti di condizionamento preindustriali. Nei capitoli che seguono, sarà data attenzione alla caratterizzazione di questi elementi. In generale, però, riconoscere la presenza di strategie di controllo ambientale in questi edifici (*buffer* superiori e inferiori, portici, canalizzazioni dell'aria, camini di ventilazione, ecc.) permette di definire il comportamento energetico dell'edificio allo stato di fatto, che è sostanzialmente differente da un edificio, cosiddetto, minore. Si può definire questa caratteristica distintiva come *metabolismo ambientale*, cioè *la capacità di un edificio storico di controllare il microclima interno, diminuendo il consumo dell'energia necessaria al mantenimento del comfort, grazie alla presenza di particolari strategie o tecniche costruttive passive*¹¹.

⁹ Si rimanda al capitolo 7 per la trattazione esaustiva dei diversi tipi di simulazioni oggi previsti dalla Normativa Italiana in campo energetico.

¹⁰ Ambrogio K., *op. cit.* p. 25.

¹¹ Significato di *metabolismo*: "Dispendio energetico dell'organismo in condizioni normali di riposo: rappresenta il fabbisogno calorico necessario al mantenimento delle funzioni vitali".

Significato di *metabolismo energetico*: "Insieme degli effetti e delle trasformazioni energetiche che accompagnano i processi chimici del metabolismo materiale"

Definizioni tratte dal Vocabolario della Lingua Italiana Treccani edizione 1986.

d) dotazione impiantistica complessa

Nella maggior parte dei casi, la destinazione d'uso degli edifici monumentali è legata ad una funzione terziaria; essi sono destinati ad ospitare musei, gallerie, uffici o sedi di istituzioni. Per questa ragione è spesso prevista, negli interventi di riqualificazione o restauro, una dotazione impiantistica più complessa, atta al controllo del microclima interno, non solo per il benessere degli utenti, ma anche per la corretta conservazione dei beni artistici contenuti (sia le opere esposte, sia gli apparati decorativi del fabbricato: si pensi ai sistemi di controllo dell'umidità o agli impianti domotici per un adattamento continuo dell'impianto alle condizioni ambientali). Per questa ragione, una valutazione del comportamento ambientale dell'edificio quanto più corretta possibile è necessaria alla progettazione e al dimensionamento di impianti adeguati, spesso complessi e particolarmente onerosi.

e) risorse economiche.

Un altro aspetto da non sottovalutare è il maggiore interesse (culturale ed economico) che gli edifici monumentali suscitano negli organi di tutela e gestione dei beni architettonici. Questo comporta che le finanze e gli sforzi professionali a disposizione siano maggiori rispetto a quelli previsti per la conservazione e il recupero dell'edilizia diffusa. Pertanto questi interventi di maggior rilevanza sono necessariamente da valutare con più attenzione nella fase di progettazione e al contempo, permettono valutazioni preliminari più sofisticate.

Per queste ragioni la tesi riserva il proprio interesse all'*edilizia storica monumentale*, intesa come parte del patrimonio storico, senza distinzione data dalla destinazione d'uso. Lo studio si occupa di quelle tipologie di edifici per cui deve essere fatta una verifica dei presupposti normativi tradizionali, quali ad esempio conventi, ville e palazzi nobiliari, per i quali è necessario valutare le semplificazioni che sono necessariamente legate ai metodi di valutazione oggi riconosciuti dalla normativa per il calcolo del fabbisogno energetico. La selezione dei casi studio è stata fortemente condizionata da queste considerazioni.

1.3.3. *Valutazione energetica dello stato di fatto*

Nel titolo della ricerca si fa riferimento ai *metodi di valutazione dello stato di fatto energetico*. La tesi, infatti, si colloca nell'ambito della riqualificazione energetica dell'edilizia storica specialistica (nelle

accezioni precedentemente delineate) ma con particolare riferimento alla fase preliminare di valutazione dello stato di fatto. Il progetto di riqualificazione energetica è contraddistinto dalle seguenti fasi¹²:

1. metaprogettuale;
2. conoscitiva;
3. di programmazione dell'intervento;
4. di verifica.

La fase 3, di *programmazione degli interventi*, prevede anche il momento del rilievo dell'edificio (architettonico ed energetico), necessario a stimare i consumi energetici prima dell'intervento. L'oggetto di indagine del lavoro di tesi presentato è, pertanto, la particolare fase del processo di progettazione degli interventi che interessa anche la valutazione dello stato di fatto energetico e ambientale (oltre che lo stato del degrado e l'analisi tecnologica). Questa fase si basa attualmente, anche per l'edificio storico, su metodi di calcolo normati da una legislazione nazionale sviluppata originariamente per edifici nuovi o di recente costruzione e non per fabbricati datati.

La *valutazione energetica e ambientale* dello stato di fatto comprende l'analisi di diversi fattori:

- dispersioni termiche attraverso l'involucro per trasmissione e ventilazione;
- influenza della morfologia architettonica sul comportamento energetico globale del fabbricato;
- capacità termiche dei materiali impiegati;
- individuazione delle strategie passive di controllo microclimatico.

Questi sono gli aspetti, oggetto della presente trattazione, ritenuti i principali fattori che governano la prestazione energetica e ambientale di un edificio storico e che determinano una maggiore difficoltà nella valutazione energetica, condotta attraverso i metodi e gli strumenti comunemente utilizzati.

In riferimento ai fattori determinanti il comportamento energetico dell'edificio storico, rispetto a quello di recente costruzione, è stata fatta un'ulteriore limitazione di campo, presentata compiutamente nel *capitolo 7*, dove sono dimostrate le ipotesi su cui si basa la ricerca.

1.4. Risultati attesi

Una volta verificate le ipotesi alla base della tesi, i risultati attesi riguardano principalmente la messa a punto di indicazioni specifiche per l'adeguamento degli strumenti di calcolo al caso dell'architettura storica. Il risultato finale del lavoro è la definizione delle proposte di affinamento dei metodi di calcolo, analitico e semplificati, per la verifica delle prestazioni energetiche degli edifici storici allo stato di fatto.

Le proposte di affinamento degli strumenti di calcolo riguardano:

¹² Una descrizione dettagliata delle fasi caratteristiche di un intervento di riqualificazione energetica è presentata nel capitolo 4.2.2

- per gli strumenti semplificati, la revisione delle soluzioni tecnologiche pre-calcolate su cui si basano le semplificazioni. In particolare, per il metodo di calcolo semplificato derivante dal corpo metodologico normativo (UNI TS 11300) il risultato previsto è la creazione di nuovi abachi tecnologici utili alla programmazione di rilievi energetici in loco per la determinazione di nuovi valori storici pre-calcolati. Per l'altro metodo semplificato analizzato (metodo *Docet*), invece, il risultato del lavoro è l'elenco degli affinamenti necessari per la creazione di un nuovo metodo *DocetHB (Docet Historical Buildings)*¹³.
- per quanto riguarda l'analisi del metodo di calcolo analitico standardizzato, invece, il risultato atteso è l'elaborazione di un metodo di rilievo energetico strumentale, specifico per l'edilizia storica, che possa essere utilizzato parallelamente all'attuale metodologia manuale di calcolo.

1.5. Destinatari della ricerca

La ricerca è rivolta principalmente al Comitato Termotecnico Italiano, l'ente che si occupa della valutazione degli strumenti di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. Attraverso le proposte di affinamento definite con lo studio ci si auspica di poter lavorare congiuntamente, in futuro, per poter sviluppare metodi di calcolo specifici, a partire proprio dai risultati di questa tesi. La dimostrazione delle ipotesi formulate può evidenziare la necessità di definire strumenti specifici attualmente mancanti. Le ricadute operative degli affinamenti proposti sono rivolte direttamente ai progettisti, nella fase di programmazione degli interventi di riqualificazione, e ai committenti, come garanzia di una maggiore salvaguardia dei beni intrinseci del fabbricato stesso e del raggiungimento del *comfort* ambientale nei propri edifici.

Per quanto riguarda l'elaborazione del metodo di rilievo energetico diretto, il lavoro è rivolto anche ai produttori di strumentazione per il rilievo energetico edilizio, affinché, attraverso i risultati della presente ricerca, si possa realizzare un *kit* semplificato e facilmente riproducibile (comprensivo di strumentazione di rilievo quali sonde di temperatura e di umidità, oltre a sistemi informatici di acquisizione dati), sviluppato appositamente per i contesti antichi (in particolare giacché non invasivo)¹⁴.

1.6. Il metodo e le fasi della ricerca

Il lavoro di tesi è suddiviso nelle tre macro-fasi che riassumono il percorso di dimostrazione delle ipotesi alla base dell'indagine. Di seguito sono schematizzate le metodologie di lavoro per ciascuna delle tre fasi:

¹³ Per una descrizione accurata dei metodi di calcolo analizzati si rimanda alla trattazione specifica, nel capitolo 7.

¹⁴ Maggiori dettagli in merito sono trattati nel capitolo 8

FASE 1. Definizione dello stato dell'arte nel campo della riqualificazione energetica del patrimonio storico (analisi bibliografica):

- analisi dei progetti di riqualificazione energetica e ambientale di edifici storici;
- analisi delle ricerche svolte da istituzioni private e pubbliche per la definizione di linee guida per l'intervento sul patrimonio storico (in Italia e all'estero);
- analisi delle ricerche svolte da istituzioni private e pubbliche per la valutazione dei metodi di indagine energetica finalizzati all'intervento sul patrimonio storico (in Italia e all'estero).

FASE 2. Studio dei metodi di calcolo del comportamento energetico:

- definizione degli strumenti di indagine energetica certificati, oggi disponibili: metodi e finalità;
- scelta dei casi studio più idonei per il confronto dei diversi strumenti di indagine applicati all'edilizia storica;
- simulazione energetica allo stato di fatto dei casi studio selezionati;
- confronto dei risultati ottenuti con i diversi metodi utilizzati (metodo analitico standardizzato e metodi semplificati);
- analisi degli aspetti del calcolo che influenzano i risultati ottenuti;
- proposte di affinamento dei metodi di calcolo indagati.

FASE 3. Sperimentazione per l'elaborazione di uno strumento di rilievo energetico specifico per l'edificio storico:

- periodo come *visiting scholar* presso la *Nottingham University, Department of Built Environment*, per l'apprendimento di tecniche di rilievo sperimentale applicate a edifici di nuova costruzione, da esportare al caso dell'edilizia storica;
- costruzione di due modelli di studio per la sperimentazione di diverse tecniche di misura;
- esportazione di tali tecniche alla tesi di dottorato e ai temi trattati: elaborazione di un sistema specifico attraverso il test di metodi diversi di rilievo sui due modelli di studio;
- raccolta ed elaborazione dei dati;
- definizione della tecnica di misura corretta.

1.7. Collocamento dell'argomento di ricerca nel settore della tecnologia dell'architettura

La presente ricerca coinvolge settori disciplinari differenti (architettura, restauro, tecnologia ed energetica). E' il frutto della compresenza di aspetti diversi nella fase iniziale di progettazione di un intervento di riqualificazione energetica, ambientale e funzionale di un edificio storico. La figura dell'architetto, che tradizionalmente svolge il ruolo di direzione e controllo delle diverse parti del progetto, è anche in questo caso quella del supervisore-coordinatore: grazie alle conoscenze e alle competenze sia tecniche, sia culturali, può governare al meglio questo processo. Il tema della valutazione degli strumenti di analisi energetica di un edificio, spesso prerogativa di fisici o ingegneri (e quindi non sempre di diretta competenza dell'architetto) diventa, nel caso dell'edilizia storica, un tema decisamente delicato che prevede la conoscenza intrinseca del patrimonio antico.

Progettando interventi per l'edilizia storica, infatti, si hanno di fronte due scenari:

1. *uno scenario noto*, costituito da una serie innumerevole di regole e normative, oltre a un massiccio corpo metodologico di calcolo delle prestazioni energetiche, elaborato originariamente per edifici nuovi o di recente costruzione (ambito energetico);
2. *uno scenario da indagare*, costituito, da un lato, dalla componente "passato", fatta di conoscenze tecnologiche e culturali consolidate da cui attingere e che vanno preservate, dall'altro, da una realtà ancora da scoprire dal punto di vista delle esigenze di *comfort* richieste dalla società di oggi e dalla necessità di risparmio delle risorse, imposto dalla crisi energetica degli ultimi anni (ambito architettonico).

È necessario combinare questi due aspetti e farli convergere in un approccio unitario al problema, che sfrutti lo scenario noto per indagare quello nuovo e sviluppare di conseguenza strumenti di valutazione più specifici e non preconfezionati.

1.8. Struttura della tesi

La tesi, oltre a una prima parte introduttiva (capitoli 1 e 2) e una ultima parte conclusiva, è strutturata in due parti che concorrono al raggiungimento dell'obiettivo principale del lavoro.

Per ciascuna parte sono evidenziati gli obiettivi specifici e i risultati raggiunti.

STATO DELL'ARTE

1. Esperienze e studi condotti nel campo della riqualificazione energetica del patrimonio storico (capitolo 3)

Questo capitolo descrive le iniziative di riqualificazione

Risultati:

- repertorio di progetti di riqualificazione energetica di edifici storici;
- valutazione critica delle principali strategie

<p>energetica di edifici antichi svolte dai professionisti senza il supporto di una ricerca scientifica ancora consolidata e condivisa. Il contributo dato da queste prime esperienze serve a definire il substrato sul quale si sono delineate le prime successive linee guida per l'intervento di riqualificazione energetica.</p>	<p>di intervento di riqualificazione energetica testate su diversi edifici campione;</p> <ul style="list-style-type: none"> - definizione dello stato dell'arte in merito alle principali strategie di intervento.
<p>2. Ricerche (nazionali e internazionali) orientate alla definizione di linee guida e buone pratiche per il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico (capitoli 4 e 6)</p> <p>Nei capitoli di questa sezione vengono presentate le ricerche affrontate fino ad oggi per la determinazione di linee guida e buone pratiche di intervento sugli edifici storici. La descrizione di tali studi serve a mettere in risalto le diverse fasi di intervento, evidenziando, nella fase dedicata al rilievo, la mancanza di indicazioni specifiche per quanto riguarda il metodo di valutazione dello stato di fatto energetico. Pertanto, si vuole dimostrare la condivisa necessità di studiare un metodo specifico per descrivere il comportamento energetico degli edifici in esame.</p>	<p>Risultati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - elaborazione di un quadro sinottico sulle norme di comportamento per un intervento di riqualificazione energetica di un edificio storico; - definizione dello stato dell'arte in merito alle ricerche sul tema della riqualificazione energetica dell'edilizia storica.
<p>3. Ricerche orientate alla valutazione del metodo di calcolo del comportamento energetico allo stato di fatto (capitoli 5 e 6)</p> <p>I capitoli 5 e 6 rappresentano lo stato dell'arte in riferimento al tema specifico dei metodi di valutazione dell'efficienza energetica e della sostenibilità ambientale applicati agli edifici storici. L'obiettivo è analizzare quanto si stia facendo e quanto sia ancora da fare per definire un metodo di valutazione specifico per questa categoria di edifici.</p>	<p>Risultati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dimostrazione della mancanza di riferimenti specifici per la definizione dello stato di fatto energetico dell'edilizia storica; - evidenziazione delle principali criticità degli strumenti utilizzati, riconosciute dalle ricerche fino ad oggi presentate.

VALUTAZIONE DEI METODI DI CALCOLO E SPERIMENTAZIONE	
<p>4. Metodi di calcolo del comportamento energetico (capitolo 7)</p> <p>Questo capitolo rappresenta il cuore della tesi. Attraverso la simulazione energetica dei casi studio sono messi a confronto i risultati di prestazione energetica ottenuti con diversi strumenti di calcolo (metodo standardizzato e metodi semplificati). Il confronto permette di valutare l'affidabilità degli strumenti applicati all'edilizia storica. In base a questo aspetto, è possibile elaborare proposte per l'adeguamento degli strumenti di calcolo alla specifica tipologia indagata.</p>	<p>Risultati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verifica dello scostamento tra i risultati ottenuti con il metodo standardizzato e i metodi semplificati; - Proposte di affinamento dei metodi di calcolo valutati.
<p>5. Rilievo energetico e ambientale (capitolo 8)</p> <p>Elaborazione di un metodo di calcolo diretto del coefficiente di scambio termico globale tramite rilievo in situ: sperimentazione su modelli in scala.</p>	<p>Risultati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - impostazione e prime applicazioni di un metodo di rilievo strumentale.

Capitolo 2. Motivazioni della ricerca

In questo secondo capitolo è stato dato maggiore risalto all'ambito in cui è collocata la ricerca spiegando in maniera più approfondita le ragioni da cui ha preso avvio il lavoro. Tale descrizione, che riguarda sia il contesto architettonico di indagine, in particolare per quanto riguarda la consistenza quantitativa e qualitativa del patrimonio architettonico italiano antico, sia quello normativo, che regola i processi edilizi in merito all'efficienza energetica, serve a inquadrare meglio gli obiettivi stessi della ricerca.

2.1. Incidenza dell'edilizia storica sul patrimonio edilizio italiano.

Le principali ricerche in merito alla riqualificazione degli edifici esistenti hanno interessato, negli ultimi anni, in particolare il parco edilizio edificato nel secondo dopoguerra, senza valenze storiche. Questa tipologia di edifici è caratterizzata, infatti, da una qualità architettonica mediamente scadente e da un pessimo comportamento energetico, a fronte di una disseminazione sul territorio molto elevata. Come si vede nella *tabella 2.1.*, gli edifici ad uso abitativo costruiti dopo il 1945 sono più di 7 milioni su circa 10,5.

Regione e Ripartizione	Epoca di Costruzione						
	Prima del 1919	1919-1945	1946-1961	1962-1971	1972-1981	1982-1991	Dopo il 1991
Piemonte	316.845	128.529	101.827	120.461	107.233	53.999	48.250
Vale d'Aosta	10.546	4.054	4.975	5.770	6.281	4.304	3.121
Lombardia	251.018	143.059	207.746	263.994	225.047	132.338	116.256
Boziano - Bozen	16.826	4.632	9.121	11.433	10.523	7.879	9.679
Trento	37.053	12.256	11.588	18.019	16.493	10.728	9.730
Trentino-Alto Adige	53.879	16.888	20.709	29.452	27.016	18.607	19.409
Veneto	148.780	93.000	146.372	205.167	184.075	98.607	84.255
Friuli-Venezia Giulia	56.088	29.286	40.323	47.764	56.520	30.053	20.280
Liguria	90.182	35.396	35.370	37.915	26.136	13.491	9.222
Emilia-Romagna	129.045	94.115	135.151	140.989	121.597	61.251	52.918
Toscana	205.268	95.522	105.764	105.588	82.869	42.317	30.394
Umbria	39.857	17.136	23.057	28.273	30.749	18.462	14.483
Marche	69.910	36.235	40.741	51.055	49.845	24.876	17.172
Lazio	99.483	66.226	111.584	139.028	162.014	101.062	53.170
Abruzzo	73.619	47.413	49.445	52.113	51.715	34.434	19.539
Molise	34.735	17.976	12.346	11.353	11.376	8.745	5.151
Campania	132.242	87.747	97.772	137.361	155.639	148.847	63.139
Puglia	123.865	107.894	132.797	159.684	188.753	127.603	53.268
Basilicata	31.714	19.621	22.811	20.882	20.518	21.495	10.931
Calabria	91.985	90.089	89.135	92.936	105.447	80.456	36.784
Sicilia	149.826	204.598	210.007	242.033	275.742	190.317	80.315
Sardegna	41.372	49.021	71.897	76.139	94.634	79.238	52.970
Nord-Ovest	668.591	311.048	349.918	426.140	364.697	204.132	176.849
Nord-Est	387.792	233.289	342.555	423.372	389.208	208.518	176.862
Centro	414.518	215.119	281.146	323.944	325.477	186.717	115.219
Sud	488.160	370.740	404.306	474.329	533.448	421.580	188.812
Isole	191.198	253.619	281.904	318.172	370.376	269.555	133.285
TOTALE ITALIA	2.150.259	1.363.815	1.659.829	1.967.957	1.993.206	1.290.502	791.027

Tabella 2.1. Censimento degli edifici ad uso abitativo per epoca di costruzione. Valori assoluti, dati per Regione e ripartizione. Fonte: dati ISTAT, Censimento 2001¹.

¹ www.istat.it/salastampa/comunicati/non_calendario/20041209_02/testointegrale.pdf.

Per questa ragione i primi grandi programmi di intervento sul patrimonio edilizio esistente sono stati indirizzati al recupero di questa consistente parte dell'edificato urbano italiano. Il panorama edilizio nazionale, tuttavia, è contraddistinto anche da una significativa quantità di edifici storici, differenti per tipologia ed età di costruzione, che spinge a fare considerazioni anche per quanto riguarda il recupero energetico degli edifici antichi.

Nei centri storici la percentuale di edifici con valore testimoniale è elevata e il cattivo comportamento energetico di tali strutture può influire negativamente sul consumo di energia globale delle città, oltre che sul *comfort* degli utenti.

In Italia, il numero di edifici a destinazione abitativa costruiti prima del 1919 è il 20% del totale: gli edifici costruiti dal 1919 al 1945 sono l'11.8%². A questi si devono aggiungere i numerosissimi a destinazione terziaria.

Certamente la vastità, l'importanza e la capillarità del patrimonio storico e artistico italiano sono percepibili anche senza dati alla mano, ma non esiste a tutt'oggi un elenco esaustivo ufficiale dei beni culturali, perché non mai è stata compiuta un'indagine sistematica di identificazione e catalogazione di tali edifici. A fronte di questa lacuna, una fonte di informazione utile è rappresentata dalla lista del patrimonio mondiale elaborata dall'UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione la Scienza e la Cultura), dalla quale risulta che l'Italia è il Paese che detiene il maggiore patrimonio culturale del mondo. Il trattato internazionale sulla Convenzione per la protezione del patrimonio mondiale, culturale e naturale, ratificato nel 1972 dalla Conferenza generale dell'UNESCO e attualmente sottoscritto da 157 Stati membri, ha il compito di definire il patrimonio mondiale formulando una lista dei siti di eccezionale valore per l'intera umanità.

Secondo tale convenzione si intendono attribuibili al patrimonio culturale mondiale *“I monumenti, gli insediamenti ed i siti aventi valore storico, estetico, archeologico, scientifico, etnologico o antropologico”*. Per poter rientrare nella lista del Patrimonio Mondiale, questi devono presentare i requisiti previsti dai criteri di iscrizione adottati dal Comitato³.

Nella tabella 2.2. sono indicati i dodici Paesi che detengono il maggior numero di siti culturali iscritti nel patrimonio mondiale; l'Italia detiene quasi il 14% dei siti culturali dei primi 12 paesi al mondo, ovvero il 6% del patrimonio culturale mondiale.

È interessante notare come questi dodici Paesi, che rappresentano meno del 10% dei 125 Paesi che compongono la lista del patrimonio culturale dell'umanità, posseggano 253 siti su 586, cioè il 43,2% del totale. Questo significa che l'esigenza di intervenire sul patrimonio storico è importante in Italia quanto in

² Dati forniti dall'Istat in base al censimento italiano del 2001. Ulteriori dati sono disponibili al sito: <http://www.istat.it/it/>.

³ I criteri per l'iscrizione di un sito al patrimonio mondiale dell'Unesco sono consultabili al sito www.patrimoniounesco.it.

altri numerosi paesi europei che, anche se in maniera meno rilevante rispetto all'Italia, presentano un patrimonio culturale notevole.

PAESI	NUMERO DI SITI CULTURALI	% SUL TOTALE PRIMI DODICI PAESI	% SUL TOTALE GENERALE
ITALIA	35	13,8	6,0
SPAGNA	34	13,4	5,8
FRANCIA	27	10,7	4,6
GERMANIA	26	10,3	4,4
REPUBBLICA POPOLARE CINESE	25	9,9	4,3
MESSICO	20	7,9	3,4
REGNO UNITO	19	7,5	3,2
INDIA	18	7,1	3,1
GRECIA	16	6,3	2,7
PORTOGALLO	11	4,3	1,9
REPUBBLICA CECA	11	4,3	1,9
SVEZIA	11	4,3	1,9
TOTALE PRIMI 12 PAESI	253	100	43,2
TOTALE GENERALE 125 PAESI	586	/	100

Tabella 2.2.

Primi dodici Paesi per numero di siti iscritti nella lista del patrimonio culturale mondiale dell'UNESCO (dati al 30 luglio 2002).

Detto ciò, in questo contesto, l'Italia, sul cui territorio nazionale risiedono 35 siti, presenta un valore addirittura quattro volte e mezzo superiore alla media europea e sette volte maggiore di quella mondiale.

L'Italia secondo l'Unesco, è il paese che oltre ad avere il maggior numero (*Tabella 2.3*) di siti del Mondo, ha anche il primato sul numero di criteri che vengono soddisfatti per l'iscrizione dei siti nella lista del patrimonio culturale dell'umanità.

Poiché ciascun sito può essere eletto come patrimonio culturale dell'umanità in ragione di una o più motivazioni, il numero complessivo di requisiti qualitativi dei siti culturali soddisfatti, costituisce un indicatore statistico interessante, in quanto rappresenta una misura indiretta del valore qualitativo, oltre che quantitativo, del patrimonio culturale nazionale.

Inoltre, il numero complessivo di criteri soddisfatti dai siti italiani è pari a 115, un valore molto più alto rispetto a quello dei Paesi immediatamente successivi nella lista, come la Spagna (85) e la Francia (67), e notevolmente al di sopra (circa sei volte) della media europea (pari a 18,9)⁴.

⁴ Fonte dei dati: ISTAT, – Servizio Popolazione Istruzione e Cultura, Arosio F., Cecchini P., a cura di, *Italia patrimonio culturale dell'umanità*, Roma, 2003.

TIPOLOGIA	QUANTITA' (STIME)
MUSEI E GALLERIE	4150 (di cui 402 statali)
SITI E MONUMENTI ARCHEOLOGICI	2100
CHIESE E CAPPELLE	85.000 soggette a tutela (di cui 30.000 di rilevante valore)
CONVENTI	1500
BIBLIOTECHE	6000
ARCHIVI	30000
GIARDINI STORICI	4000
DIMORE STORICHE (VILLE E PALAZZI)	40000
ROCCE E CASTELLI	20000

Tabella 2.3.
Patrimonio architettonico italiano: beni singoli⁵.

TIPOLOGIA	NUMERO (STIME)
CENTRI STORICI PRINCIPALI	900
CENTRI STORICI MINORI	6850
NUCLEI ABITATI STORICI (nuclei isolati, frazioni, borghi, villaggi, insediamenti religiosi e militari)	15000

Tabella 2.4.
Patrimonio architettonico italiano: aggregati storici.

Fonte: elaborazione CENSIS su dati ISTAT e ICCD, in CENSIS (2003) - XXXVII, *Rapporto sulla situazione sociale del paese*. <http://www.censis.it>.

Il Ministero per i Beni e le Attività Culturali ha censito 22.750 centri storici diffusi sul territorio, divisi in centri storici principali, minori e nuclei abitati storici (Tabella 2.4.) e 46.025 beni architettonici vincolati, ai quali possono essere aggiunti 5.668 beni archeologici a fronte di circa 8.000 comuni. Per quanto riguarda l'epoca di fondazione dei centri storici catalogati, circa il 30% risale ad epoca romana e pre-romana, più del 50% all'epoca medievale (tra il IX secolo e il 1380), e il restante 20% al Rinascimento e a epoche successive.

⁵ Elaborazione CENSIS su dati ISTAT, Associazione dimore storiche, Touring Club Italiano, in CENSIS (2003) – XXXVII, *Rapporto sulla situazione sociale del paese*. <http://www.censis.it>.

2.2. Motivazioni per la ricerca nel campo della riqualificazione energetica del patrimonio storico

È evidente, anche alla luce di questi dati quantitativi, che molte città italiane siano costituite in gran parte da edifici vecchi o antichi che richiedono spesso un impegno maggiore nella progettazione di un intervento conservativo e migliorativo, rispetto a quello da dedicare ad un corrente processo di nuova costruzione residenziale.

Il tema della riqualificazione energetica dell'edilizia storica sta raccogliendo recentemente sempre maggiore interesse da parte di diversi soggetti coinvolti nel settore delle costruzioni (enti di ricerca, progettisti, imprese, pubbliche amministrazioni e privati) che riconoscono l'esigenza di monitorare il comportamento energetico anche dell'edilizia storica con valore artistico e testimoniale, oltre a quello del patrimonio esistente diffuso non storicizzato. I motivi che spingono verso questa nuova prospettiva nascono dall'elevato numero di edifici storici presenti sul nostro territorio nazionale, e in molti altri paesi europei, e dal fatto che essi rappresentano una quota elevata degli edifici correntemente in uso. Molte istituzioni (forze dell'ordine, sedi di Comuni e Province, ecc.), molte funzioni pubbliche (scuole, teatri, musei, ecc.) e tante residenze hanno sede in edifici storici (sia che si tratti di edifici specialistici, sia che si parli di edilizia di base). Di conseguenza tale patrimonio non può essere escluso dall'evoluzione tecnologica degli ultimi anni, finalizzata a soddisfare le nuove esigenze di *comfort* degli utenti, perché tali edifici sono parte integrante ed imprescindibile della vita contemporanea della società. In molte città italiane, gli edifici antichi non rientrano solo in un percorso turistico ai margini della vita cittadina, ma ne costituiscono il principale scenario. Il momento dell'intervento, seppur conservativo, deve diventare l'occasione per introdurre una nuova funzione o un nuovo apparato tecnologico in grado di mantenere la struttura al passo con l'evoluzione suddetta e di promuovere la valorizzazione del bene. Questo deve essere l'approccio per cercare di dare un reale futuro all'edificio senza privilegiarne solo il valore architettonico e testamentario, a discapito della possibilità di viverlo in maniera confortevole. Perché l'edificio sia, o torni ad essere, un *contenitore* di funzioni, esso deve poter rispondere alle richieste dell'utenza in termini di qualità della vita interna, oltre ai presupposti richiesti dalla disciplina del restauro e dalle normative antisismiche.

Un'indagine⁶ mostra, tra l'altro, che i cittadini italiani si sentono chiamati in causa in prima persona nella conservazione del proprio patrimonio culturale, che sentono come vitale per il paese (*Figure 2.1. e 2.2.*). Questo significa che esiste la possibilità di sfruttare, oltre agli sforzi degli esperti del settore, anche l'entusiasmo della popolazione, per rafforzare un senso di "dovere" nei confronti degli edifici storici sempre

⁶ Indagine condotta da: Doxa, Associazione Mecenate 90, *Gli Italiani e il loro patrimonio culturale – Analisi dei risultati*, Roma 24 Giugno 2003.

più condiviso. Coinvolgere chi abita gli edifici significa aumentare la possibilità di successo di questa operazione.



Figura. 2.1. Indagine relativa all'interesse da parte dei cittadini in merito alla conservazione del patrimonio culturale italiano. I dati mostrano il forte interesse per gli interventi sugli edifici storici⁷.

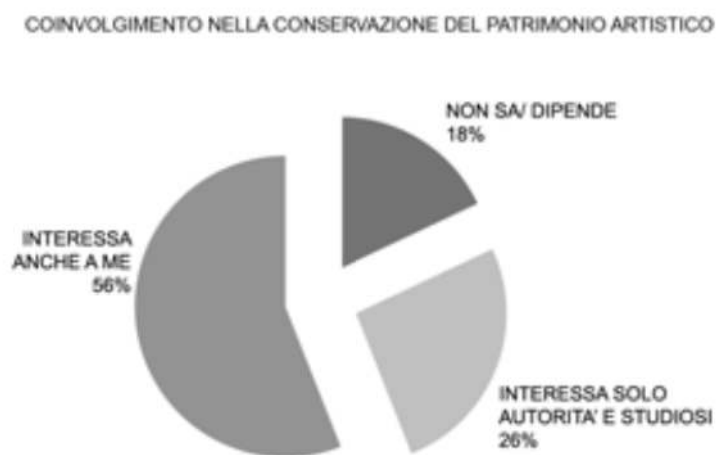


Figura. 2.2. Indagine relativa al coinvolgimento da parte dei cittadini nelle operazioni di conservazione del patrimonio culturale italiano. Il 56% degli intervistati afferma sentirsi coinvolto nella conservazione del patrimonio artistico⁸.

⁷ *Ibidem*.

Intervenire su un edificio storico facendo attenzione ai suoi consumi energetici non significa comprometterne il valore artistico e testimoniale, ma significa, al contrario, lavorare per sfruttare le sue caratteristiche intrinseche per un più accurato controllo ambientale ed energetico degli ambienti interni.

Pertanto, accanto al progetto di restauro e rifunzionalizzazione di un edificio storico, appare sempre più improcrastinabile l'esigenza di adeguarlo alle direttive imposte dalle normative nazionali e regionali in termini di efficienza energetica.

Perché questo avvenga senza pregiudicare l'integrità e l'identità della fabbrica storica, è fondamentale conoscere l'edificio allo stato di fatto, sia da un punto di vista architettonico (rilievo architettonico, delle decorazioni, studio della storia evolutiva del fabbricato, ecc.) sia da un punto di vista energetico. Guardando le opere del passato è chiaro come l'uomo abbia, più o meno consapevolmente, costruito fin dalle origini pensando la propria casa come uno spazio per controllare il clima.

Lo stesso Vitruvio nel *De Architectura* scrive: *"Per una retta disposizione degli edifici, bisognerà prima considerare in quali regioni e sotto quale latitudine vengano costruiti. Poiché i procedimenti costruttivi variano a seconda delle varie proprietà delle regioni; e in Egitto non come in Ispagna, o nel Ponto, o a Roma; giacché la terra in una parte è premuta più da vicino dal corso del sole, in altra parte ne è più distante, e nel mezzo è temperata. Ne consegue che, come la costituzione del cielo rispetto alla terra è naturalmente determinata dall'inclinazione dello zodiaco e dal corso del sole con disparate caratteristiche, così egualmente si pensa che la collocazione degli edifici debba essere regolata secondo i caratteri delle regioni e le varietà del cielo.*

Verso nord gli edifici debbono essere a volta e ben chiusi, e senza aperture, ma rivolti verso le parti calde. Al contrario, sotto l'impeto del sole, nelle regioni meridionali, ove il calore opprime, le costruzioni devono essere aperte e rivolte a settentrione e all'aquilone. Così il difetto di natura si deve emendare coll'arte. Ad analoghi temperamenti si deve procedere per altre regioni a seconda della latitudine. [...]"⁹

Per questo motivo, in determinati contesti geografici ed epoche storiche sono stati inventati sistemi di controllo ambientale sofisticati che sono arrivati ad oggi come substrato culturale del *fare architettura* nel passato. Si pensi, per esempio, alle torri del vento Iraniane, diffuse in tutto il mondo arabo, alle terme romane, alle "camere dello Scirocco"¹⁰ o ai sofisticati sistemi di ventilazione e riscaldamento inventati per

⁸ *Ibidem.*

⁹ Vitruvio, *De Architectura*, Libro Sesto, Editrice Dedalo Roma, 2004, 71.

¹⁰ In Sicilia e in particolare a Palermo, tra il XVI e il XVIII secolo, si diffuse l'usanza di realizzare grandi ambienti ipogei scavati direttamente nella roccia sotto a palazzi o nei giardini delle ville chiamate Camere dello Scirocco. Scopo di questi ambienti era di offrire riparo dal caldo afoso che nelle giornate di Scirocco opprimeva la città. La pianta era generalmente rotonda o quadrata e spesso all'interno vi erano corsi d'acqua o vasche per un'ulteriore abbassamento della temperatura.

la climatizzazione dei palazzi nobiliari tra Cinquecento e Ottocento, che possono essere letti come i precursori dei moderni impianti di climatizzazione.

Attraverso un sistema molto sofisticato di canalizzazioni, si mettevano in comunicazione i saloni con ambienti ipogei, cantine o grotte, in modo che l'aria fresca dei sotterranei potesse affluire nel luogo deputato al soggiorno.

Negli spazi interrati, spesso, veniva aggiunta anche una ghiacciaia per aumentare l'effetto raffrescante, oppure si sfruttava la presenza di un corso d'acqua¹¹.

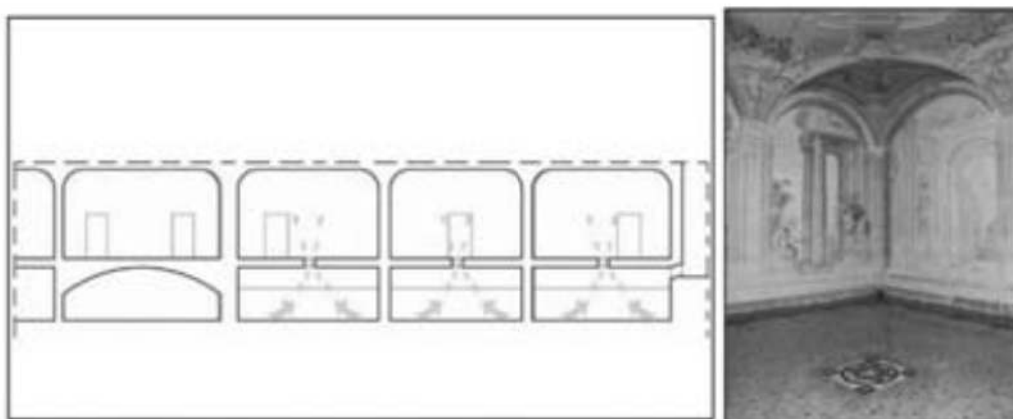


Figura 2.3. Sezione e fotografia di Palazzo Corsini a Firenze, quartiere estivo. Nell'immagine è schematizzato l'uso del piano ipogeo per il raffrescamento passivo degli ambienti e l'immissione dell'aria fresca nella sala attraverso i rosone collocati a pavimento¹².

Sistemi molto simili venivano impiegati anche per la climatizzazione invernale. In questo caso si sfruttava il calore fornito dai camini, presenti solo negli ambienti principali, per riscaldare l'aria, che veniva fatta passare in canalizzazioni realizzate nei muri, in prossimità della fonte di calore. In questo modo l'aria calda veniva portata in tutti i piani e immessa negli ambienti attraverso bocchette o rosone.

¹¹ Un esempio è rappresentato dal sofisticato impianto di Palazzo Corsini a Firenze, costruito a metà Seicento. Si veda Balocco C., Farneti F., Minutoli M., *I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici: palazzo Pitti a Firenze e Palazzo Marchese a Palermo*, Alinea Editrice, Firenze, 2009, p. 9.

¹² *ivi*, p. 33.

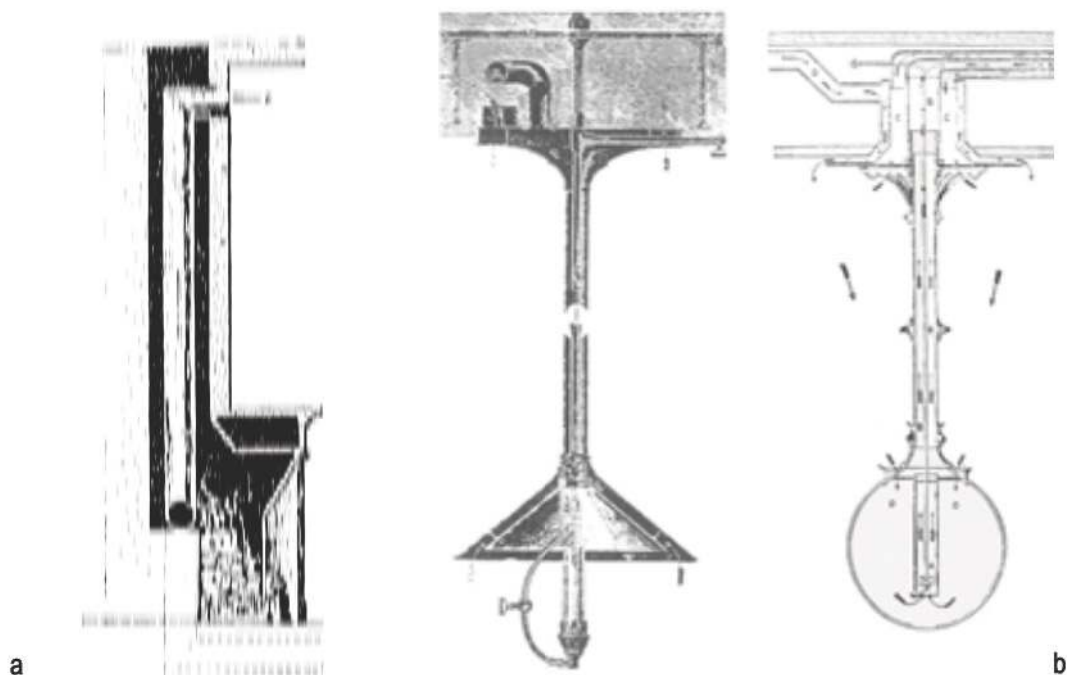


Figura 2.4. nella figura di sinistra (a) è rappresentata la sezione del camino di Pelet, in cui il condotto dell'aria è all'interno della canna fumaria. Il calore dei prodotti della combustione che passa per la cappa riscalda l'aria dentro il condotto e vi induce i moti convettivi necessari per avere aspirazione di aria esterna e immissione di aria calda negli ambienti. Nell'immagine di destra (b) si vede un lampadario all'interno del quale il calore prodotto dalla combustione attiva un moto convettivo dell'aria che, passando attraverso lo spazio lasciato fra calotta riflettente e il carter esterno, fuoriesce attraverso canalizzazioni appositamente predisposte nel solaio¹³.

In molti casi la fonte di riscaldamento era collocata al piano terra, in quella che può essere definita una vera e propria centrale termica. Da qui si diramavano tutte le tubazioni nel resto dell'edificio.

¹³ Cfr: Cetica P., *L'architettura dei muri intelligenti. Esperienze di climatizzazione sostenibile nell'Ottocento*, Angelo Pontecorvoli Editore, Firenze, 2004, p. 27 e 52;

Morin A. *Manual pratique du chauffage et de la ventilation*, Libraire e L.Hachette, Parigi, 1868.

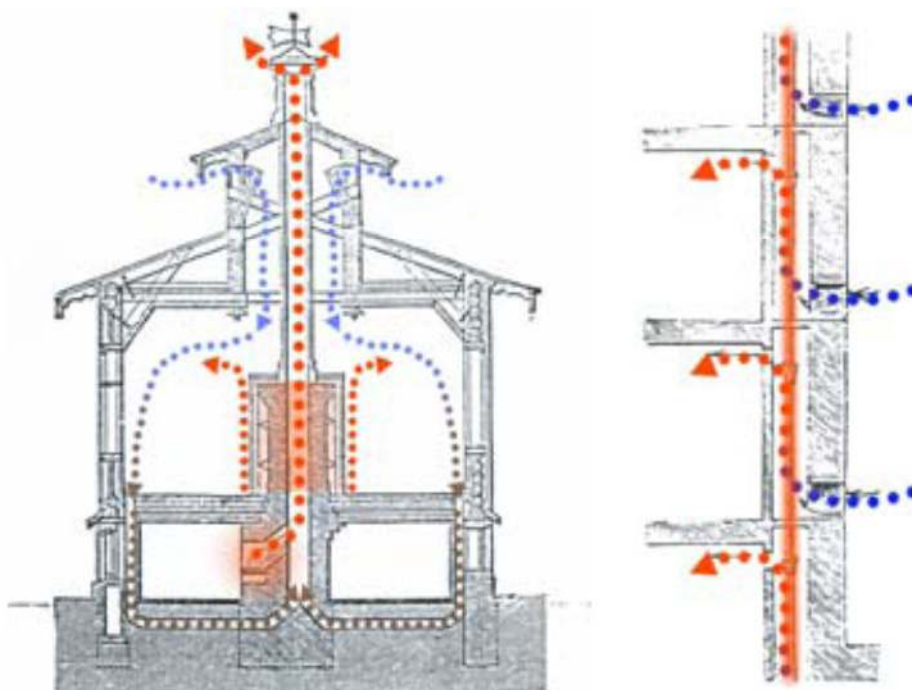


Figura 2.5. L'immagine illustra un ospedale di S. Pietroburgo. La fonte di calore principale è posta in un locale apposito al piano terra e scarica i prodotti della combustione in una tubazione che attraversa una stufa posta al primo piano che scalda l'ambiente. A questa poteva essere collegato un sistema di canalizzazioni che, attraverso bocchette a muro, distribuivano l'aria calda su tutto l'edificio¹⁴.

Questi sistemi, solo alcuni dei molti presenti nelle architetture del passato, sono arrivati fino a noi, celati nell'involucro di edifici che tutt'ora vengono abitati e adattati alle nuove esigenze della vita contemporanea. Ai progettisti di oggi è chiesto di saper riconoscere questi stratagemmi energetici per poterli riscoprire, riutilizzare e farli diventare parte integrante del progetto di riqualificazione. Un'attenta analisi dello stato di fatto energetico del fabbricato è la fase preliminare di qualunque intervento di progettazione su un edificio storico.

Una valutazione corretta del comportamento energetico e ambientale dell'edificio allo stato di fatto è necessaria per:

- progettare opportunamente gli interventi, dal punto di vista sia dei materiali, sia delle tecnologie, finalizzati a risolvere i problemi individuati per quel particolare fabbricato e non sulla base di

¹⁴ Si rimanda a: Cetica P., *op.cit.* e Villiamier A., *Assainissement atmospherique des grandes cities pat ventilation artificielle*, Pontarlier, 1931.

strategie generalizzate e determinate sulla base di edifici differenti per tipologia ed epoca di costruzione;

- prevedere soluzioni che valorizzino il *metabolismo ambientale* dell'edificio senza stravolgerne la natura con interventi che, invece di migliorare il comportamento energetico, rischierebbero di comprometterlo;
- progettare soluzioni volte sia al miglioramento del *comfort* interno per gli utilizzatori del fabbricato, sia ad un controllo mirato del microclima negli ambienti per la conservazione delle opere e degli apparati decorativi, eventualmente in essi contenuti.

La criticità, però, legata alla possibilità di condurre una valutazione corretta è duplice. Da una parte è data dalla mancanza di una normativa di settore che funga da riferimento per la definizione del comportamento energetico allo stato di fatto dell'edificio storico, dall'altra è causata da uno stato dell'arte sulla riqualificazione energetica dell'edilizia storica ancora molto recente e in continua evoluzione.

Per questa ragione, nell'ultimo periodo numerose ricerche si sono occupate della riqualificazione energetica degli edifici storici. Sia centri di ricerca universitari sia enti pubblici hanno rilevato l'urgenza di una gestione migliore del patrimonio storico. Per citare un esempio, il Ministero dei Beni e delle Attività Culturali (MiBAC) ha emanato le proprie linee guida per interventi di *energy retrofit* su edifici storici, con l'intenzione di diminuire il costo di gestione del proprio patrimonio che richiede, ad oggi, risorse economiche eccessive. Molte delle indagini presentate hanno l'obiettivo di proporre delle linee guida di intervento per la riqualificazione energetica del patrimonio storico. L'intento principale è cercare le soluzioni per l'involucro e per le componenti impiantistiche più idonee ad un intervento in un contesto storicizzato, analizzando soprattutto il livello di compatibilità delle tecnologie proposte con i sistemi decorativi o gli ambienti di pregio entro cui devono essere installate. Le ricerche prendono in esame le procedure di intervento consolidate e/o innovative e le adeguano al contesto storico. Nei capitoli 4 e 6 sono presentati i contributi più significativi che costituiscono, ad oggi, lo stato dell'arte in merito al tema della riqualificazione energetica dell'edilizia storica.

2.3. *Excursus normativo*

Il panorama normativo di seguito riassunto si riferisce alla sola legislazione Italiana, in materia di efficienza energetica, e alla legislazione europea alla quale fa riferimento l'Italia. La scelta di limitare all'Italia la trattazione in relazione alla normativa è legata allo sviluppo del lavoro. Le valutazioni sul metodo di calcolo della prestazione energetica degli edifici sono fatte per quanto riguarda il metodo di calcolo utilizzato sul territorio Italiano (D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009 – *Regolamento delle metodologie di calcolo e dei requisiti*

minimi per le prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva e per l'acqua calda sanitaria; D.M. del 26 Giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, che definisce le procedure applicative della certificazione energetica degli edifici). Sebbene sia presentato nel capitolo 6 uno stato dell'arte anche a livello internazionale, la ricerca è strettamente legata al panorama edilizio storico Italiano. La ragione prevalente risiede nel fatto che l'Italia, prima di altri paesi, si sta impegnando ad affrontare il problema della riqualificazione energetica del patrimonio storico, sia perché è detentrica del maggior numero di beni "tutelati", sia per l'alto livello architettonico e la varietà tipologica degli stessi. Per queste ragioni si propone di seguito una breve rassegna della evoluzione normativa italiana in materia di efficienza energetica.

Legge 373/1976

La legislazione Italiana sul controllo dei consumi energetici esiste fin dalla crisi petrolifera degli anni Settanta, quando viene emanata la legge 373/76 – *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici degli edifici*¹⁵, che imponeva un controllo degli impianti per edifici di nuova costruzione. Essa fu attuata attraverso l'emanazione del D.P.R. 1052/77, del D.M. del 10 marzo 1977 dove, per la prima volta, si parla di zone climatiche, coefficienti volumici di dispersione termica, rapporto S/V (superficie esterna lorda e volume lordo riscaldato), gradi giorno e classificazione degli edifici. Queste prime legislazioni impongono l'isolamento termico per i nuovi edifici e migliori prestazioni termiche per l'involucro.

Legge quadro 308/1982

La prima volta che si parla, però, di intervento di riqualificazione energetica del patrimonio esistente è nel 1982 con la prima legge quadro (308/82), che prevede di stanziare fondi statali attraverso le regioni per interventi di questo tipo.

Legge 10/1991

Il passo decisivo fu nel 1991 con l'emanazione della *Legge 10 – Norme per l'attuazione del Piano Energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*¹⁶. La legge si occupa di regolamentare l'uso di energia per il riscaldamento,

¹⁵ La legge del 30 Aprile 1976, n. 373 impone all'art. 1 che "Al fine di contenere il consumo energetico per fini termici negli edifici, sono regolate dalla presente legge le caratteristiche di prestazione dei componenti, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda per usi igienici sanitari, alimentati da combustibili solidi, liquidi o gassosi".

¹⁶ Pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 13 del 16 Gennaio 1991, divisa in tre Titoli:
Titolo I: *Norme in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*

rendendo definitive le indicazioni già emerse nel decennio precedente e introducendo una nuova procedura per la verifica energetica degli edifici (sistema *edificio – impianto*). La legge prevede di dividere il paese in sei zone climatiche (Art. 4), definite in base alla velocità dei venti e a coefficienti di esposizione, attribuendo a ciascuna zona determinate temperature. È con questa legge che si parla per la prima volta di certificazione energetica degli edifici (Art. 30), con l'obbligo di redazione in caso di compravendita o locazione e validità temporale di 5 anni (per edifici pubblici o privati, nuovi o esistenti). Gli strumenti per l'attuazione della legge sono il D.P.R. 412/93 e il D.P.R. 551/99, atti a disciplinare i vari calcoli, tra cui quelli per il *fabbisogno energetico normalizzato* (FEN), il *rendimento medio stagionale* e il *rendimento globale medio stagionale*, facendo riferimento a diverse norme UNI.

I principali obiettivi della legge sono:

- risparmio energetico (interventi sull'edificio, sugli impianti di controllo del microclima e di illuminazione);
- uso consapevole dell'energia;
- salvaguardia dell'ambiente;
- benessere degli individui;
- incentivazione dell'uso di fonti rinnovabili di energia;
- incentivazione dell'uso di sistemi impiantistici alternativi.

Direttiva 2002/91/CE del 16 Dicembre 2002

La certificazione della qualità energetica dell'edificio era già stata prevista dalla Direttiva n.93/76/CEE (Direttiva *Save*). Con la pubblicazione della Direttiva 2002/91/CE del 16 Dicembre 2002 sul rendimento energetico dell'edilizia (*Energy Performance Building Directive – EPBD*), l'UE adotta una serie di misure e interventi necessari per conformarsi al protocollo di Kyoto: l'edificio, gli impianti di riscaldamento, di condizionamento, di illuminazione e di aerazione devono essere progettati ed funzionare con un basso consumo di energia nel rispetto del benessere degli occupanti. La Direttiva ha l'obiettivo di “[...] promuovere uno strumento per il miglioramento del rendimento energetico degli edifici e la salvaguardia ambientale nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi” (art. 1).

La Direttiva riporta disposizioni riguardanti:

- metodologia generale per il calcolo del rendimento energetico *integrato* degli edifici;

Titolo II: *Norme per il contenimento del consumo di energia negli edifici.*

Titolo III: *Disposizioni finali.*

- requisiti minimi di rendimento energetico degli edifici distinguendo fra edifici nuovi e ristrutturazioni e fra differenti categorie di edifici;
- certificazione energetica degli edifici;
- ispezione periodica degli impianti termici e di condizionamento.

D.Lgs n. 192 del 19 Agosto 2005

In Italia la direttiva 2002/91/CE viene recepita con il D.Lgs n. 192 del 19 Agosto 2005¹⁷ sul rendimento energetico. Il provvedimento opera per:

- imporre dei limiti in termini di fabbisogno di energia primaria e di trasmittanza dell'involucro;
- imporre l'obbligo di certificazione energetica. In caso di intervento su edifici esistenti l'applicazione della norma cambia a seconda del tipo di intervento:
 - i. ristrutturazione integrale degli elementi edilizi costituenti l'involucro di edifici con superficie utile superiore a 1000 m²: *applicazione integrale a tutto l'edificio*¹⁸;
 - ii. demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria di edifici con superficie utile superiore a 1000 m²: *applicazione integrale a tutto l'edificio*;
 - iii. ampliamenti superiori al 20% dell'esistente: *applicazione integrale limitata al solo ampliamento*;
 - iv. ristrutturazioni totali o parziali di edifici con superficie inferiore a 1000 m², ampliamenti inferiori al 20%, manutenzione straordinaria dell'involucro edilizio e nuova installazione di impianti termici in edifici esistenti: *applicazione limitata*¹⁹ al rispetto di specifici parametri, livelli prestazionali e prescrizioni.

D.Lgs 311/2006

Il D.Lgs 192/2005 prevedeva la certificazione energetica solo per edifici di nuova costruzione. Il successivo D.Lgs 311/2006, in accordo con la Direttiva Europea, amplia tale regolamento anche agli edifici esistenti, imponendo ad essi, oltre alla certificazione energetica, anche il raggiungimento di specifici standard di efficienza energetica, in caso di intervento.

¹⁷ Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23 Settembre 2005 e in versione aggiornata n. 241 del 15 Ottobre 2005.

¹⁸ Con applicazione integrale si intende il rispetto di certi limiti di valore del fabbisogno di energia primaria [kWh/m²a] (cfr capitolo 7), suddivisi per zona climatica e per rapporto S/V (superficie/volume).

¹⁹ Con *applicazione limitata al rispetto di specifici parametri*, si intende il rispetto di alcuni parametri di trasmittanza termica o di certi limiti di rendimento per gli impianti.

In particolare vengono richieste specifiche verifiche in funzione della tipologia di intervento e della categoria di edifici.

D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009 e D.M. del 26 Giugno 2009

In seguito sono stati emanati due decreti attuativi del D.Lgs 192/2005:

- il D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009 – regolamento delle metodologie di calcolo e dei requisiti minimi per le prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva e per l'acqua calda sanitaria;

- il D.M. del 26 Giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, che definisce le procedure applicative della certificazione energetica degli edifici.

La finalità è di aumentare il grado di comparabilità delle certificazioni energetiche sull'intero territorio nazionale. Le linee guida si applicano a tutte le Regioni che non abbiano ancora adottato i propri strumenti di certificazione e comunque fino all'entrata in vigore dei predetti strumenti. Le altre Regioni dovranno operare un graduale riavvicinamento della propria legislazione in materia²⁰.

I due decreti adottano come metodologie di calcolo le norme tecniche nazionali (UNI TS 11300 – si rimanda al capitolo 7).

Direttiva 2010/31/UE del 19 maggio 2010

Il più recente aggiornamento (e integrazione) della Direttiva 2002/91/CE esce nel 2010 con la Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 Maggio. Tale direttiva dovrà essere recepita dagli stati membri entro il 9 Luglio 2012.

Nell'introduzione si legge (comma 7): *“È necessario predisporre interventi più concreti al fine di realizzare il grande potenziale di risparmio energetico nell'edilizia, tuttora inattuato, e di ridurre l'ampio divario tra i risultati dei diversi Stati membri in questo settore”*.

Le innovazioni principali rispetto alla precedente direttiva sono:

- gli Stati Membri devono provvedere affinché entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero (Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili) e affinché a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati e di proprietà di enti pubblici siano a energia quasi zero;

- l' attestato di prestazione energetica comprende raccomandazioni per il miglioramento energetico in funzione dei costi della prestazione energetica dell'edificio o dell'unità immobiliare, a meno

²⁰ Per le specifiche iniziative e leggi regionali si rimanda ai rispettivi regolamenti.

che manchi un ragionevole potenziale per tale miglioramento rispetto ai requisiti di prestazione energetica in vigore (art. 11, comma 2);

- gli Stati membri provvedono affinché un attestato di prestazione energetica sia rilasciato sia per edifici e unità immobiliari costruiti, venduti o locati ad un nuovo locatario, sia per gli edifici in cui una metratura utile totale di oltre 500 m² è occupata da enti pubblici e abitualmente frequentata dal pubblico²¹. Il D.Lgs 192/2005 ha rappresentato per L'Italia lo strumento di recepimento della Direttiva Europea (2002/91/CE). Ogni Regione Italiana ha poi emanato propri regolamenti locali validi entro i propri confini amministrativi.

2.4. Vincoli e deroghe

Il Codice dei Beni Culturali e Paesaggistici²² afferma²³:

1. *Il patrimonio culturale è costituito dai beni culturali e dai beni paesaggistici.*
2. *Sono beni culturali le cose immobili e mobili che, ai sensi degli articoli 10 e 11, presentano interesse artistico, storico, archeologico, etno-antropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà.*
3. *Sono beni paesaggistici gli immobili e le aree indicati all'articolo 134, costituenti espressione dei valori storici, culturali, naturali, morfologici ed estetici del territorio, e gli altri beni individuati dalla legge o in base alla legge.*
4. *I beni del patrimonio culturale di appartenenza pubblica sono destinati alla fruizione della collettività, compatibilmente con le esigenze di uso istituzionale e sempre che non vi ostino ragioni di tutela.*

Tale vincolo di tutela, una volta riconosciuto, impone al proprietario del bene di sottostare ai regolamenti ad esso connessi, godendo di una libertà limitata del bene stesso. Per questo, l'esecuzione di opere e lavori di qualunque genere su beni culturali è subordinata ad autorizzazione del Soprintendente (o altro organo competente del Ministero).

Per quanto riguarda la legislazione in materia di risparmio energetico, però, le indicazioni sono ancora piuttosto generiche.

Il D.Lgs 311/2006 (Art. 3 comma 3) afferma:

Sono escluse dall'applicazione del presente decreto le seguenti categorie di edifici e impianti:

²¹ Dal 9 Luglio 2015 la soglia di 500 m² sarà abbassata a 250 m².

²² D.Lgs 42/04 modificato con D.Lgs 24 Marzo 2006 n.156 e n. 157 e D.L. 3 Giugno 2008 n. 97.

²³ D.Lgs 42/04, articolo 2 – Patrimonio culturale.

- a) *gli immobili ricadenti nell'ambito della disciplina della parte seconda e dell'articolo 136, comma 1, lett. b) e c) del decreto legislativo 22 Gennaio 2004, n. 42, recante il codice dei beni culturali e del paesaggio nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto con particolare riferimento ai caratteri storici o artistici; [...].*

Tale affermazione riprende il testo della normativa Europea²⁴ senza implementarla con ulteriori indicazioni:

Gli Stati membri possono decidere di non istituire o di non applicare i requisiti di cui al paragrafo 1 per le seguenti categorie di fabbricati:

- *edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro speciale valore architettonico o storico, nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto;*
- *edifici adibiti a luoghi di culto e allo svolgimento di attività religiose [...].*

Pertanto, tutte le decisioni riguardo interventi volti al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici storici vincolati sono lasciate alle proposte del progettista e poi al vaglio da parte degli organi di tutela dei beni vincolati. Se da una parte, questo significa maggiore flessibilità negli interventi (non è richiesto che le soluzioni presenti o da adottare rispondano ai limiti normativi più stringenti, in materia energetica) dall'altro, significa non avere obiettivi, limiti o termini di paragone sulle caratteristiche energetiche del patrimonio storico italiano. Aggirare il problema rifacendosi alla *deroga* è senz'altro garanzia di interventi non "forzati", che cerchino di adattare alla normativa energetica vigente edifici storici dove è difficile ottenere prestazioni energetiche equiparabili alla nuova costruzione. D'altra parte, però, senza un termine di paragone tra gli interventi, non è possibile valutare il reale comportamento energetico di tali edifici e, in taluni casi, non se ne può neppure valutare la qualità costruttiva indipendentemente dai valori storici e architettonici che sono già riconosciuti dal vincolo di tutela posto su di essi. Il problema è ancora più delicato nei casi di edilizia storica con valore testimoniale ma senza vincolo; è il caso diffusissimo dell'edilizia storica di base, che costituisce gran parte del tessuto aggregativo dei centri storici italiani. Questa categoria di edifici, ancora normata dalla Legge 457/1978²⁵, confluita poi nell'attuale testo Unico (D.P.R. n. 380/2001 e successive modificazioni), non è soggetta al controllo di alcun organo

²⁴ Direttiva 2002/91/CE Art. 4, comma3, poi confermato con la Direttiva 2010/31/UE, art 4, comma 2.

²⁵ Legge 5 Agosto 1978, n. 457: Norme per l'edilizia residenziale, pubblicata nella G.U. del 19 Agosto 1978, n. 231.

istituzionalmente deputato alla tutela delle fabbriche storiche e ricade nella prassi operativa di tutti gli altri edifici esistenti.

Viste le caratteristiche proprie dell'edilizia storica e la sua estrema eterogeneità tipologica, la questione dell'efficienza energetica andrebbe posta in un'ottica di *miglioramento* piuttosto che di *adeguamento*, come previsto anche dalla Direttiva 2002/91/CE. Infatti, un adeguamento prevedrebbe, nella maggior parte dei casi, una sostanziale modifica o sostituzione dei sistemi materico-tecnologici tradizionali. Al contrario, l'intervento di miglioramento sembra rappresentare la posizione più condivisa (da progettisti e sovrintendenti) alla ricerca di una sintesi dialettica tra i principi conservativi e le esigenze prestazionali²⁶. Pertanto, è necessario rifarsi alla normativa vigente, non in un'ottica di *certificazione* energetica ma di *valutazione* energetica, per alimentare lo sviluppo degli strumenti legislativi, non volto alla mera classificazione degli edifici, ma ad una maggiore conoscenza di questi manufatti sotto tutti i profili, compreso quello energetico.

Non è pensabile assecondare la normativa anche per gli edifici storici così come si delinea oggi, ma sarebbe senz'altro interessante cercare di definire nuovi criteri di diagnosi e nuovi limiti energetici.

La tesi di dottorato qui presentata vuole fornire un possibile contributo all'elaborazione di una normativa specifica per il caso studio dell'edilizia storica. Questo non significa necessariamente trasformare integralmente i regolamenti oggi utilizzati, ma analizzarli e adattarli alle esigenze imposte da un intervento di *miglioramento* energetico dell'edilizia storica.

Prima di parlare di certificazione energetica del patrimonio storico e cercare nuovi limiti di riferimento è necessario valutare il metodo sul quale si basa tale criterio di classificazione. Non si ritiene urgente, oggi, rendere obbligatorio un attestato di certificazione energetica anche per le compravendite e le locazioni di edifici vincolati, quanto, invece, si considera urgente poter valutare gli interventi di riqualificazione possibili su di essi. Nei paragrafi precedenti si è cercato di evidenziare quanto il tema della riqualificazione energetica degli edifici storici sia importante e diffuso. Per questa ragione, è necessario che vi sia, quanto prima, un ordinamento che, invece di presentare opzioni di deroga, metta in condizione di valutare correttamente la compatibilità e la reale necessità di un'azione sull'edificio. Se il metodo di calcolo della prestazione energetica da normativa (UNI TS 11300, parti 1-2-3) non è nato per far fronte a questo specifico problema, potrebbe essere che le valutazioni energetiche preliminari fatte sul fabbricato spingano il progettista a ipotizzare soluzioni di incremento prestazionale non necessarie o, peggio, nocive per l'edificio.

²⁶ Ambrogio K., Dalla Negra R., *Miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia storica: tra istanze conservative e prestazionali*, in P. Davoli, a cura di, "Il Recupero energetico e ambientale del costruito", Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, p. 29.

Una valutazione dello stato di fatto energetico dell'edificio non corretta può condurre il progettista verso la realizzazione di un nuovo sistema di isolamento per l'involucro, anche in situazioni dove una valutazione corretta avrebbe portato ad escludere tale proposta. Di conseguenza anche la valutazione dell'intervento di riqualificazione progettato o realizzato non rappresenterà il reale comportamento del fabbricato (per gli esempi di questa criticità si vedano i *capitoli 4 e 5*).

Un sistema di riferimento specifico e consolidato, inoltre, sarebbe un utile ausilio al ruolo di tutela esercitato dalla Soprintendenza (o di altro organo competente del Ministero) nella assegnazione o meno del permesso di attuare la modifica proposta.

Il lavoro qui presentato, pertanto, valuta proprio il metodo descritto dalla UNI TS 11300 adottato dalla normativa nazionale in riferimento alle prestazioni energetiche in edilizia²⁷, per definire quali criticità del metodo rientrino nelle approssimazioni riconosciute come accettabili e quali, invece, siano da imputare all'uso di uno strumento non dedicato.

Normativa tecnica di riferimento

Di seguito sono elencati i testi della normativa che regola il settore edilizio in materia di efficienza energetica e su cui si basa il lavoro di ricerca presentato.

- L. 373/1976

Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.

- L. 10/1991

Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

- DIRETTIVA EUROPEA 91/2002/CE

Sul rendimento energetico nell'edilizia.

- D.LGS. 192/2005

Attuazione della direttiva 91/2002/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

²⁷ D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009 – regolamento delle metodologie di calcolo e dei requisiti minimi per le prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva e per l'acqua calda sanitaria; il D.M. del 26 Giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, che definisce le procedure applicative della certificazione energetica degli edifici.

- D.LGS. 311/2006

Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 192/2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

- D.P.R. 59/2009

Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 192/2005, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia.

- DIRETTIVA EUROPEA 2012/27/UE, 25 Ottobre 2012 Sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE.

Normativa UNI di riferimento

UNI EN ISO 10077

Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti. Calcolo della trasmittanza termica.

UNI EN ISO 10211-1e2

Ponti termici in edilizia. Calcolo dei flussi termici e delle temperature superficiali. Parte 1 Metodi generali, parte 2 Ponti termici lineari.

UNI EN ISO 14683

Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineica. Metodi semplificati e valori di riferimento

UNI EN ISO 13370:2001

Trasferimento di calore attraverso il terreno.

UNI EN ISO 13779

Ventilazione degli edifici non residenziali. Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione.

UNI EN ISO 13788:2003

Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale.

UNI EN ISO 13789:2008

Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione.

UNI 10351

Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.

UNI 10339

Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti.

UNI TS 11300:2008

Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;

Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Inoltre, la norma UNI TS 11300 comprende, nella metodologia di calcolo che contiene, ulteriori normative per le quali si rimanda alla bibliografia della norma stessa.

Per la normativa Regionale in materia di efficienza energetica si rimanda all'Appendice A.

▪

▪

Capitolo 3. Esperienze e studi per la riqualificazione energetica del patrimonio storico

I capitoli 3, 4 e descrivono lo stato dell'arte relativo al tema del recupero energetico degli edifici storici. L'obiettivo non è solo quello di descrivere il contesto culturale dal quale prende avvio la ricerca, ma è anche quello di dimostrare l'ipotesi sulla quale si basa l'intera tesi, ovvero, la necessità di analizzare nel dettaglio il metodo di valutazione dello stato di fatto energetico applicato al caso dell'edilizia storica. Per questa ragione lo stato dell'arte viene presentato suddiviso in tre distinti capitoli.

Il capitolo 3 descrive le iniziative di riqualificazione energetica di edifici antichi condotte dai professionisti senza il supporto di una ricerca scientifica ancora consolidata e condivisa. Il contributo dato da queste prime iniziative serve a definire il substrato dal quale si sono sviluppate le successive linee guida per l'intervento di riqualificazione energetica.

3.1. Repertorio di progetti di riqualificazione energetica di edifici storici.

Il tema della riqualificazione energetica ha iniziato recentemente ad interessare sempre più spesso anche i progettisti chiamati ad intervenire su fabbricati antichi. In particolare, una tale esperienza viene colta come l'occasione per sperimentare l'integrazione di tecnologie innovative (materiali isolanti, impianti ad alta efficienza o fonti rinnovabili) in contesti particolari e complicati, dove la richiesta di contenimento dei consumi energetici deve necessariamente coniugarsi con l'istanza conservativa.

Tuttavia, non esiste ad oggi un'esperienza scientifico – sperimentale strutturata che permetta di accumulare il comportamento energetico dell'edilizia storica per trarne informazioni utili, esportabili al caso generale. Infatti, sono molto recenti gli studi che si occupano di definire linee guida di intervento per la riqualificazione energetica degli edifici storici (si veda capitolo successivo). Prima di tali indagini vi era solo qualche esperienza sporadica di applicazione di alcune strategie di intervento su singoli progetti, elaborate a partire dalla quotidiana e comune pratica di alcuni progettisti chiamati ad interventi di questo genere. Le strategie proposte devono essere considerate come le prime vere sperimentazioni in questo campo, supportate da risultati diversi e in molti casi anche soddisfacenti. Alcuni progetti sperimentali sono stati condotti dai singoli professionisti che hanno unito alla professione, alcune attività di ricerca nel campo specifico o dalle fondazioni e gli organi per la tutela dei beni architettonici. Un esempio interessante è

.....

rappresentato dal progetto dell'Istituto Regionale Ville Venete¹ per il restauro sostenibile degli edifici monumentali e dei loro contesti. Il progetto prevede una serie di giornate di incontri e progetti pilota per la definizione di interventi di riqualificazione energetica delle ville venete. Tra gli esempi più significativi si trovano i progetti elaborati dallo studio Feiffer e Raimondi² per Villa Contarini e Villa Astori. I progetti si pongono come primo obiettivo l'analisi attenta dello stato conservativo degli edifici, anche per quanto riguarda analisi termografiche, delle stratigrafie originali e delle prestazioni energetiche per una proposta di intervento migliorativo.

Altri esempi interessanti si collocano in Italia settentrionale, in particolare per quanto riguarda il recupero di edifici vincolati di tradizione alpina (un esempio significativo è il premio per *l'ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni*, che ogni due anni stabilisce riconoscimenti per uno o più progetti di riqualificazione energetica di edifici esistenti³).

Di seguito sono presentati, catalogati in schede di progetto, alcuni degli esempi più significativi di intervento energetico su edifici storici, che rappresentano il primo stadio dello stato dell'arte in materia. La trattazione non pretende di essere esaustiva ma intende presentare le principali strategie di intervento energetico su edifici storici, sperimentate fino ad oggi, in diversi contesti di riferimento. Di seguito al suddetto repertorio è poi proposto un contributo critico degli interventi analizzati, finalizzato a definire il processo attraverso cui si compie un progetto di riqualificazione energetica, all'interno del quale si inserisce la tesi di dottorato.

¹ L'ente nasce con la legge 6 marzo 1958, n. 243 quale consorzio tra Amministrazioni Provinciali per il Turismo delle province di Belluno, Padova, Rovigo, Treviso, Udine, Verona, Venezia, Vicenza, al quale lo stato delega compiti specifici di tutela attraverso l'intervento economico (mutui e contributi) ma anche di competenza, quali l'espropriazione e la salvaguardia, attraverso la presenza di alcuni Soprintendenti nel Consiglio di amministrazione dell'Ente. www.irvv.net.

² Studio di architettura e restauro arch. Cesare Feiffer e Anna Raimondi, Venezia e Cremona.

³ *Premio Ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni*, indetto dalla ripartizione Acque pubbliche ed energia, dalla ripartizione Beni culturali della Provincia Autonoma di Bolzano con il patrocinio dell'Ordine degli Architetti, Pianificatori, Paesaggisti e Conservatori della Provincia di Bolzano e della Fondazione dello stesso. www.provincia.bz.it/acque-energia/energia/ottimizzazione-energetica.asp.

SCHEDA N. 1

Nome progetto: **Castel Flavon**

Luogo: **Bolzano**

Progetto: **arch. Dietmar Dejori**

Anni 2001-2002

Spesso, intervenendo in contesti particolarmente delicati, è necessario limitarsi a garantire gli *standard* di efficienza energetica richiesti dalle normative solo sugli inserimenti di nuovi volumi edilizi (il cui rapporto con il fabbricato originario è ritenuto compatibile). Questo progetto dimostra che si può operare anche sulla preesistenza, migliorando il comportamento energetico degli ambienti antichi racchiusi da involucri datati e così difficilmente riscaldabili per garantire gli alti livelli di *comfort* interno richiesti. Questo è possibile attraverso interventi puntuali e diffusi, anziché globali. In questo esempio, interessanti risultati sono stati raggiunti attraverso interventi sulla costituzione del tetto, sulle finestre (sostituzione con profili sottili, ma egualmente prestanti), sui solai a terra (strato coibente ed impermeabilizzante in vetro cellulare), o con la coibentazione dall'interno prevista per alcuni vani. Particolare sensibilità è stata posta nella progettazione della nuova addizione, che si stacca dalle strutture esistenti per la salvaguardia delle antiche murature. È stata proposta una soluzione progettuale principalmente a secco (vetrate con grandi prestazioni isolanti e pacchetti di chiusura in legno altamente coibentati) per creare nuovi spazi e volumi ad elevate prestazioni, separati dal muro di cinta non modificabile nel suo aspetto originario. All'interno delle parti storiche il miglioramento dell'isolamento termico è stato realizzato a livello di estradosso del solaio superiore, oppure intervenendo sul pacchetto di copertura che è stato riprogettato con spessori adeguati di isolamento (salvo la riproposizione dei coppi antichi e il consolidamento e restauro della struttura storica in travi lignee)⁴.

Interventi energetici proposti:

- Nuovo strato coibente ed impermeabilizzante in vetro cellulare per il solaio a terra;
- Coibentazione interna e della copertura;
- Giustapposizione di nuovi elementi performanti, staccati dall'involucro originale;

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 90 kWh/m²a

⁴ Ulteriori riferimenti: Davoli P., *Il senso della riqualificazione energetica del patrimonio storico architettonico tutelato, in un momento di crisi economico-energetica e di complessità normativa*, «L'ufficio tecnico», n. 22/2009 e Davoli P., *E ora la riqualificazione energetica del costruito. Un intervento imprescindibile, complesso, allettante sul patrimonio edilizio variamente storicizzato*, «L'ufficio tecnico», n. 4/2007, p. 27-36.

SCHEDA N. 2

Nome progetto: **Casa in via Vanga**

Luogo: **via Vanga, Bolzano**

Progetto: **arch. Deitmar Dejori**

L'intervento di riqualificazione energetica del fabbricato, sottoposto a tutela da parte della Soprintendenza, ha seguito i seguenti criteri: sulla facciata secondaria a nord (quella opposta al fronte strada principale), è stato inserito un cappotto esterno in pannelli di fibra di legno (spessore 10 cm) e finitura con intonaco minerale termoisolante a base di calce idraulica naturale (spessore 2 cm), anziché con una semplice rasatura su rete; sulla facciata principale (esposta a sud), protetta dal vincolo di tutela per la presenza di cornici e modanature in esterno e di qualche porzione affrescata, è stato invece applicato un cappotto interno, sempre in pannelli di fibra di legno (spessore 4 cm) e finitura in terra cruda (argilla, spessore 3 cm). Quest'ultima scelta deriva dalla volontà di avere, a contatto con il muro in pietra, più facilmente soggetto a formazione di condensa, uno strato di rivestimento interno con effetto spugna (igro-regolazione) rinunciando, quindi, alla barriera al vapore posta sul lato interno dell'isolante.

Anche il tetto è stato fortemente coibentato con fibra di legno.

Le prime reticenze della Soprintendenza sono state successivamente fugate da un'accuratissima esecuzione in cantiere⁵.

Interventi energetici proposti:

- Cappotto esterno in pannelli di fibra di legno (10 cm): facciata nord
- Isolamento interno in pannelli di fibra di legno (4cm) e finitura in terra cruda: Facciata sud

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione = 164 kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 67 kWh/m²a

⁵ Ulteriori riferimenti: Davoli P., *Il restauro – energetico ambientale degli edifici storici. Un percorso progettuale fra antichi saperi, costruzioni tutelate e tecnologie innovative*, «Recupero e Conservazione», deLettera Editore, n. 90/91, Marzo 2010 e Davoli P., *Il senso della riqualificazione energetica del patrimonio storico architettonico tutelato, in un momento di crisi economico-energetica e di complessità normativa*, «L'ufficio tecnico», n. 22/2009.

SCHEDA N. 3

Nome progetto: **Casa Aichner**Luogo: **Città Alta, Chiusa**Progetto: **arch. Christoph Mayr Fingerle**Concetto energetico: **Jochen Cristofoletti**Committenza: **Famiglia Aichner**

"Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni" – Edizione 2006

Il nucleo urbano medievale di Chiusa si estende per circa 500 metri tra la porta Nord della città e il torrente Tina. Affacciati sulla strada principale, su stretti lotti rettangolari, sono nate nel tempo le case borghesi, divise tra la cosiddetta *Città Alta* e *Città Bassa*. In linea con la tradizione tipologica del tempo, anche *Casa Aichner*, situata nella Città Alta, presenta una planimetria stretta ed allungata. Verso la strada fu costruito il primo nucleo abitativo a cui furono annessi un cortile interno con scale e, rivolto a monte, un fienile realizzato prevalentemente in legno. Nel corso dell'ultima ristrutturazione, la porzione residenziale sul lato strada è stata rivisitata attraverso un intervento che ha mantenuto intatta la ripartizione in tanti piccoli spazi. Del fienile, invece, sono stati mantenuti soltanto i muri laterali, mentre la facciata sul lato nord è stata demolita. Ad oggi gli interni, articolati in piccole stanze, si contrappongono agli spazi aperti e intercomunicanti del fienile. Mantenere questa peculiarità della preesistenza ha consentito di introdurre più luce all'interno del manufatto: infatti, la facciata nord è stata completamente realizzata in vetro.

Una nota particolare merita l'intervento sulle aperture: le due ante esterne delle antiche doppie finestre sono state ripristinate secondo il disegno originale (con vetro singolo e partitura a listelli), mentre quelle interne sono state eseguite senza suddivisioni e con vetri a bassa trasmittanza termica (valore $U=1,0$ W/m^2K).

Grazie alla posizione urbanistica del fabbricato che si inserisce in un sistema insediativo estremamente compatto e all'isolamento del tetto con 18 cm di pannelli in fibra di legno, il fabbisogno termico dell'edificio è diminuito, dopo l'intervento di riqualificazione energetica, ad un valore di 75 kWh/m^2a . Il dato è assai interessante per un edificio vincolato, per il quale sono stati preferiti interventi modesti orientati al mantenimento del linguaggio architettonico e dell'estetica originari, piuttosto che operazioni maggiormente performanti ma meno compatibili⁶.

⁶ Ulteriori riferimenti: *Premio per l'ottimizzazione energetica* e Davoli P., *Il restauro – energetico ambientale degli edifici storici*, op.cit., Davoli P., *Il senso della riqualificazione energetica del patrimonio storico architettonico tutelato, in un momento di crisi*

Giudizio della giuria:

Il progetto di Christoph Mayr-Fingerle a Chiusa conquista in primo luogo tramite la sua definizione architettonica e il restauro differenziato e sensibile dell'edificio tutelato. Le finestre ricostruite sono tecnicamente ottimizzate. Ciò nonostante l'ottimizzazione energetica sembra rimanere in secondo piano rispetto alle ambizioni estetiche. La nuova facciata del granaio per esempio è un elemento debole dal punto di vista dell'ottimizzazione energetica. La giuria decide di premiare il progetto specialmente per l'accuratezza verso l'edificio tutelato e il valore architettonico.

Interventi energetici proposti:

- Mantenimento dell'impianto distributivo originale;
- Coibentazione del tetto con 18 cm di pannelli in fibra di legno;
- Ricostruzione delle vecchie finestre doppie con vetri singoli per i battenti esterni e vetri termoisolanti per quelli interni ($U_w=1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 75 kWh/ m²a

SCHEDA N. 4

Nome progetto: **Ex edificio postale**

Luogo: **via Renon, Bolzano**

Progetto: **arch. Michael Tribus**

"Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni" – Edizione 2006

Si tratta del primo edificio pubblico in Italia con obiettivo "*Passivhaus*", con un consumo che corrisponde a circa 12 kWh/m² per anno.

L'edificio è caratterizzato da un volume compatto e da aperture molto regolari. Per stemperare questo linguaggio seriale si è giocato con gli smussi esterni delle finestre, raggiungendo così una composizione vivace e suggestiva. Sono state realizzate differenti conformazioni degli sguinci grazie ai 35 cm di spessore del cappotto esterno. Il progetto prevede diverse tipologie di sguincio, realizzate mediante isolanti pre - sagomati di tipo economico.

economico-energetica e di complessità normativa, op.cit..

In questo particolare frangente il cappotto esterno, variamente sagomato in prossimità delle aperture in funzione della penetrazione solare, diventa anche strumento di originalità e riattualizzazione morfologica dei fronti.

Nel corridoio interno di distribuzione ai vari livelli, le canalizzazioni del sistema a ventilazione controllata e le batterie di post riscaldamento sono state integrate all'interno della carteratura traslucida e con i corpi illuminanti. Le porte hanno anime cave e bocchette lineari che, nella posizione chiusa, permettono il ripescaggio nel loro spessore dell'aria viziata⁷.

Interventi energetici proposti:

- Coibentazione della facciata con 35 cm di isolante pre - sagomato;
- Integrazione impianto di ventilazione controllata.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima la ristrutturazione: 200 kWh/ m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 12 kWh/ m²a

SCHEDA N. 5

Nome progetto: **Casa Spechtenhauser**

Luogo: **via Venosta, Lasa**

Progetto: **arch. Ruth Pinzinger e arch. Arnold Rieger**

Committenza: **Dietmar e Verena Spechtenhauser**

“Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni” – Edizione 2006

Le mura massicce in pietra a vista di questo fienile, che risale a più di cent'anni fa, lo rendono un elemento caratteristico di Lasa. Per questa ragione il piano di recupero del comune prevede la conservazione delle facciate. Nell'ambito della trasformazione del fienile in un edificio residenziale la struttura esistente è stata svuotata dell'interno ed è stata inserita una struttura statica autonoma. Tra le mura storiche e le nuove pareti interne c'è una camera d'aria.

Una scala a mezza chiocciola conduce dall'ingresso all'appartamento al primo piano. Qui, tutte le stanze sono disposte intorno ad un cortile a lucernario centrale, il quale è collegato alla terrazza orientata a sud

⁷ Ulteriori riferimenti: *Premio per l'ottimizzazione energetica* e Davoli P., *Il restauro – energetico ambientale degli edifici storici. Un percorso progettuale fra antichi saperi, costruzioni tutelate e tecnologie innovative*, «Recupero e Conservazione», deLettera Editore, n. 90/91, Marzo 2010.

tramite una seconda scala. Le grandi finestre permettono alla luce e al calore di inondare lo spazio domestico⁸.

Giudizio della giuria:

Il progetto di Ruth Pinzger e Arnold Rieger a Lasa dimostra alte qualità nell'ambito del restauro della struttura esistente. Con il sistema della "casa nella casa" la facciata è stata preservata nel suo stato originale. L'abitazione introversa si apre grazie alla sua terrazza verso il paesaggio, quest'elemento è notato positivamente dalla giuria mentre critica la mancanza di generosità nello spazio interno in riferimento alle originali dimensioni della vecchia costruzione. La messa in atto del concetto architettonico non è riuscita in ogni dettaglio. Tutto sommato il progetto convince la giuria e viene premiato.

Interventi energetici proposti:

- Inserimento di una nuova struttura coibentata con 6 cm di pannelli in minerale espanso giustapposta alle mura storiche;
- Coibentazione del tetto con 14 cm di pannelli in fibra di legno;
- Installazione di nuove finestre con vetri termoisolanti.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 90 kWh/m²a

SCHEDA N. 6

Nome progetto: **Zeughaus - Deutsches Historisches Museum**

Luogo: Berlino

Progetto: **Winfried Brenne Architekten**

Anno 2006

Lo *Zeughaus*, edificato nel 1706, è l'edificio conservato più antico situato sul viale *Unter den Linden* di Berlino e allo stesso tempo è il più significativo grande edificio barocco della città. Costruito come arsenale di armi, esso ospita dal 2006 il Deutsches Historisches Museum (Museo storico tedesco). Fu soggetto ad una lunga ristrutturazione, attenta anche agli aspetti energetici.

Sfruttando lo spessore consistente della muratura, sono state inserite unità di condizionamento estivo-invernale in corrispondenza di ogni singola apertura finestrata. I terminali sono installati sotto bancale (con

⁸ *Ibidem.*

griglie di comunicazione verso l'esterno, integrate nel telaio fisso del serramento) ed abbinati all'impiego di lastre di vetro complanari alla finestra, distanziati da essa e fra di loro per separare i flussi in entrata e in uscita e incanalarli in intercapedini indipendenti.

Questa soluzione permette di conservare una visuale assoluta attraverso la finestra. La decentralizzazione non è solitamente conveniente, ma il recupero di superficie utile, altrimenti dedicata ai locali impiantistici, oltre all'eliminazione dalla vista delle canalizzazioni di distribuzione, diversamente invasive, è interessante come esempio di integrazione impiantistica in ambiente storico. Intervento molto simile, dello stesso staff di progettazione, è quello realizzato nel Castello di *Charlottenburg* a Berlino⁹.

Interventi energetici proposti:

- Integrazione nel sistema parete – infisso finestrato del sistema di condizionamento dell'aria

Dati di consumo non disponibili

SCHEDA N. 7

Nome progetto: **Casa Glauber**

Luogo: **Bolzano**

Progetto: **arch. Manuel Benedikter**

Committenza: **Famiglia Glauber**

"Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni" – Edizione 2008

L'edificio principale della residenza *Koffler*, realizzato nel 1749 e posto interamente sotto tutela, fu arricchito verso nord di una serra per gli agrumi, trasformata poi in residenza nel 1925. Le pareti perimetrali in pietrame, con spessore fino a 70 cm, creano un corpo di fabbrica stretto ed allungato, svantaggioso dal punto di vista del comportamento energetico. L'intervento di riqualificazione energetica, in accordo con la soprintendenza per i beni architettonici, ha permesso di intervenire sulle aperture delle finestre nella facciata rivolta a ovest dell'ex *orangerie*, ingrandendole rispetto all'originale¹⁰.

Interventi energetici proposti:

⁹ *Ibidem*.

¹⁰ *Ibidem*.

- Sono stati inseriti 26 cm di isolante termico fra le travi del solaio che regge la terrazza;
- Sulle facciate nord ed ovest è stato applicato un cappotto esterno di 20-26 cm di spessore;
- Il fronte est, particolarmente vincolato, è stato isolato dall'interno, separando termicamente anche le teste delle pareti divisorie;
- È stato realizzato un impianto di ventilazione controllata con accumulo di calore e scambiatore geotermico, nonché una caldaia a pellets.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione: 30 kWh/m²a

SCHEDA N. 8

Nome progetto: **Maso Huber**

Luogo: **monte Fröllerberg, Comune di Rodengo**

Progetto: **arch. Lorenz Pobitzer con Konstantin Tengler,**

Katrin Raab, Matthias Gotter, Christof Auer

Concetto energetico: **Walter Malleier** (riscaldamento)

Committenza: **Stefan Klotzner & Verena Ellecosta**

"Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni" – Edizione 2008

Il maso *Huber*, costituito da un edificio ad uso abitativo e da un grande fienile, risale al XIV-XV sec. L'involucro della *stube* è databile verso il 1730-50 circa. Prima della ristrutturazione il maso, sottoposto a tutela, era degradato e non rispondeva più alle attuali esigenze abitative. La ristrutturazione ha permesso di ricavare due unità abitative. Nella ristrutturazione degli interni si è utilizzato ferro nero per scale e ringhiere, quarzite micacea per il corridoio e la cucina al piano terra, e larice spazzolato per i pavimenti. Il bassissimo soffitto al piano superiore è stato parzialmente rimosso, dando maggior luce agli ambienti attraverso gli abbaini vetrati. Il tavolato di questi ultimi è stato sostituito con telai aperti in listelli di larice. Il tetto è stato coperto con un manto di scandole in larice¹¹.

Giudizio della giuria:

Il maso Huber dimostra un'ambiziosa concezione architettonica, particolarmente impegnata nel

¹¹ *Ibidem.*

coinvolgimento della sostanza edilizia storica. Il risanamento energetico è stato affrontato con sensibilità e con attenzione alle diverse situazioni costruttive della preesistenza. Tuttavia sussistono delle obiezioni rispetto al restauro, in quanto un edificio posto sotto tutela esige un rapporto più filologico con i materiali e il trattamento delle superfici. Nel restauro del maso Huber l'utilizzo di materiali e superfici estranee all'oggetto, come la quarzite brillante nell'atrio passante (labe), ne distorcono l'immagine. Sarebbe stato opportuno un intervento più sommo e meno artefatto. Ciononostante la giuria decide all'unanimità di premiare il maso Huber per l'impegno nel risanamento energetico e architettonico.

Interventi energetici proposti:

- Al piano interrato le pareti in pietra sono state foderate verso l'interno con una parete in blocchi di cemento cellulare;
- Il sottofondo controterra è stato colmato con 50 cm di schiuma di vetro granulare con la funzione di isolamento termico e drenaggio;
- Sotto i rivestimenti lignei delle *stube* sono stati inseriti pannelli isolanti in fibra di legno da 2+2 cm;
- Al piano superiore le pareti esterne e il tetto sono state isolate dall'interno con pannelli in fibra di legno rispettivamente da 16 e 20 cm;
- Sul tetto dell'ovile è stato installato un impianto fotovoltaico.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione: 151kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione: 57 kWh/m²a

SCHEDA N. 9

Nome progetto: **Maso Oberegger**

Luogo: **Comune di Rasun, Anterselva**

Progetto: **archilab – Hannes Ladstätter, Sarah Gasparotto, Stefan Taschler**

Concetto energetico: **Davide Pairsi**

Committenza: **Christian & Marlies Leitgeb**

“Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni” – Edizione 2008

Il maso *Oberegger* fa parte degli antichi masi della val Anterselva, ed è citato negli archivi sin dal 1296. Definito nella sua forma attuale intorno al 1850, il rivestimento ligneo della *stube* risale al 1859. Il maso, che non è tuttora posto sotto tutela, prima dell'intervento versava in pessimo stato di conservazione. Oggi

funge da locale per la ristorazione e da abitazione, e, insieme ai nuovi alloggi per vacanze realizzati in legno, il fienile e una azienda agricola confinante, forma un insieme d'aspetto spontaneo. Il maso è stato ampliato verso nord e collegato con gli annessi vani produttivi interrati, destinati alla lavorazione dei prodotti agricoli. Il sottotetto è stato recuperato. Sui fianchi est ed ovest nuove facciate intonacate sovrapposte in funzione di protezione termica contengono l'esistente come tra due parentesi¹².

Giudizio della giuria:

I nuovi interventi e le vecchie parti della costruzione danno luogo a un nuovo insieme, la costruzione e la copertura progrediscono, come un tempo, col riuso della preesistenza disponibile. La nuova destinazione ricettiva giustifica anche l'intervento delle facciate intonacate sovrapposte in prospetto. Questa ristrutturazione in buona parte auto-costruita, attrae per la semplicità del trattamento architettonico. L'architetto dimostra una visione lungimirante, preservando la modestia dell'architettura anonima da un inadeguato design. La ristrutturazione del maso Oberegger è un progetto esemplare dal punto di vista energetico, che nel suo approccio architettonico intelligente e riuscito ricostruisce sull'esistente in maniera non pretenziosa.

Interventi energetici proposti:

- cappotto in minerale espanso da 14 a 16 cm, sulle facciate est e ovest;
- isolamento interno in fibra di legno di 6 cm sul fronte sud;
- coibentazione sottotetto con 20 cm di lana minerale;
- caldaia biomasse alimentata con scarti del maso stesso.

Dati di consumo non disponibili

SCHEDA N. 10

Nome progetto: Studio progettuale per il **Monastero di Sant'Antonio in Polesine**

Luogo: **Ferrara**

Progetto: **arch. Laura Bonora, arch. Marta Calzolari**

Anno 2008

Il secondo chiostro di S. Antonio in Polesine rappresenta un luogo importante per Ferrara perché sorge

¹² Ulteriori riferimenti: *Premio per l'ottimizzazione energetica*.

nel suo nucleo originale. Dopo anni di abbandono richiede di essere restituito alla città diventando sede della soprintendenza archeologica e luogo di esposizione dei reperti archeologici affiorati dagli scavi effettuati nel complesso. Pertanto l'edificio è stato suddiviso in due aree, distinte per funzione: una parte destinata al museo e una pensata per i nuovi uffici. Questa scelta ha portato a creare un percorso nel museo per visitare l'edificio senza creare commistione tra le diverse attività che si è concretizzato in una passerella che attraversa gli ambienti fino ad uscire dal perimetro della muratura storica. Il percorso si affaccia all'esterno e viene chiuso in una scatola di vetro, nuova pelle per l'edificio.

Contemporaneamente alle esigenze funzionali, il progetto ha contribuito al miglioramento del comportamento energetico del complesso.

Oggi l'edificio è privo di impianto di climatizzazione e di isolamento termico. In prima istanza, si è progettato il nuovo impianto a pannelli radianti a pavimento per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo. Il fabbisogno termico del complesso, di 154 KW, ha suggerito di produrre l'acqua calda per i pannelli attraverso l'uso di una microturbina a gas. Ciò permette di utilizzare un sistema di "cogenerazione allargata" e di produrre energia elettrica e termica contemporaneamente. Per l'involucro è stata pensata l'applicazione di 6 cm di termointonaco sul lato esterno delle murature (prospetti sul giardino), che consente di creare uno strato rilevante di isolamento senza alterare il prospetto storico. Il prospetto sul chiostro, invece, che presenta particolari pregi architettonici, è stato isolato dall'interno con 8 cm di fibra di legno. La nuova facciata vetrata, che racchiude al proprio interno la passerella, crea un ambiente filtro non climatizzato fra l'interno e l'esterno. Ciò porta ad una rilevante diminuzione delle dispersioni termiche dei prospetti che si affacciano sul nuovo vano nella stagione invernale e al miglioramento del microclima interno nella stagione estiva¹³.

Interventi energetici proposti:

- Nuovo galleria vetrata (spazio filtro) con impianto fotovoltaico semitrasparente in copertura;
- Impianto di climatizzazione: trigenerazione (con pannelli radianti a pavimento);

¹³ Ulteriori riferimenti: Bonora L., Calzolari M., 2008, *Riqualificazione funzionale, ambientale e energetica del secondo chiostro di S. Antonio in Polesine. Un nuovo polo culturale a Ferrara*, Studio progettuale, Università degli studi di Ferrara, Ferrara, 2008; Calzolari M., 2010, *Dalla chiusura del passato all'apertura del moderno. Recupero energetico del convento di S. Antonio in Polesine per un nuovo polo culturale a Ferrara*, in P. Davoli, a cura di, «Il Recupero energetico e ambientale del costruito», Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, p. 110.

Davoli P., *Il senso della riqualificazione energetica del patrimonio storico architettonico tutelato, in un momento di crisi economico-energetica e di complessità normativa, op.cit.*;

- Impianto di ventilazione controllata con recuperatore di calore;
 - Isolamento con termointonaco (6 cm): prospetti sul giardino (nord-Ovest);
 - Isolamento interno con fibra di legno (8 cm): prospetti del chiostro.
- Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione = 355 kWh/m²a**
Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 11 kWh/m³a

SCHEDA N. 11

Nome progetto: **Restauro scientifico dell'ex Monastero Cistercense di Santa Lucia**

Luogo: Faenza, Ravenna

Progetto: **A+4 Studio, arch. Paolo Rava**

Si tratta di un edificio del '700 destinato a refettorio in cui sono stati proposti (e approvati dalla Soprintendenza competente) un sistema energetico per il regime estivo e un intervento per la riqualificazione energetica in regime invernale. Il progetto consiste nella posa di un cappotto esterno eco-sostenibile in incanniccato palustre e successiva finitura a spessore con intonaco di cocciopesto.

Del sistema "metabolico" di riqualificazione complessiva fa parte anche l'introduzione di una lama verde ventilata posta a protezione della parete, citazione dei tradizionali rampicanti parietali, rivisitate attraverso un linguaggio morfologico moderno.

Il modello di funzionamento ambientale sfrutta il nuovo vano scala per incrementare, con effetto camino, i moti convettivi naturali provenienti dall'interrato ed integrarli al sistema vegetale¹⁴.

Interventi energetici proposti:

- Realizzazione di un cappotto esterno in incanniccato e finitura con intonaco cocciopesto
- Realizzazione di una parete con verde rampicante ventilata;
- Ventilazione naturale incentivata dall'effetto camino

Dati di consumo non disponibili

¹⁴ Ulteriori riferimenti: Davoli P., «Il Recupero energetico e ambientale del costruito», *Op.cit.*, p.23.

SCHEDA N. 12

Nome progetto: **Sito museale "Antiquarium"**

Luogo: Villa del foro, Alessandria

Progetto: **arch. Vittorino Belpoliti**

Concorso di idee per la valorizzazione del sito museale "Antiquarium" (Villa del Foro) mediante interventi volti a massimizzare la prestazione energetica dell'edificio. 2009

Progetto secondo classificato

Oggetto del progetto è una ex-scuola ottocentesca, ora sede del museo di archeologia locale.

La sua destinazione d'uso, atta a preservare oggetti dal valore storico, suggerisce la stessa cura nei confronti dell'edificio stesso. La funzione educativa, che il museo mostra nell'espone i reperti al pubblico, deve riflettersi nell'esposizione dei valori storici ed estetici anche dell'edificio, prima attrazione del sito.

Secondo il *concept* di progetto, l'edificio viene recuperato come fosse esso stesso un reperto archeologico e collocato all'interno di una teca di vetro, che lo ripari e lo mostri al prossimo. Questa idea si concretizza tecnologicamente in un involucro vetrato che ha funzioni estetiche, di protezione del manufatto e infine di incremento delle prestazioni energetiche.

Lo stato in cui verte la copertura ne impone il rifacimento, mantenendo la tipologia a padiglione, ma impiegando materiali innovativi. La nuova chiusura vetrata diventa il principio di una nuova immagine dell'edificio. La falda sud ospita un impianto fotovoltaico semitrasparente (di tipo matriciale).

Il rivestimento delle facciate diventa un proseguimento del gesto architettonico di copertura, e completa l'involucro vetrato. Questo è composto da lastre bassoemissive, e opera a regime variabile: a celle per aumentare le caratteristiche isolanti dell'involucro in inverno; ventilato per raffrescare il paramento murario ottocentesco in estate.

L'involucro sigillato permette inoltre l'installazione di un sistema per la ventilazione meccanica, incluso di recuperatore di calore. In questo modo, i notevoli ricambi d'aria causati dall'erronea ventilazione dei locali e dalle infiltrazioni sono regolati, con la conseguente riduzione delle dispersioni per ventilazione.

Il nuovo impianto di climatizzazione prevede l'utilizzo di una pompa di calore geotermica, che sfrutta l'ampio giardino di fronte all'edificio¹⁵.

Interventi energetici proposti:

- Nuovo involucro vetrato a doppia pelle (vetrocamera bassoemissivo);

¹⁵ *ivi*, p. 83.

- Impianto di climatizzazione con pompa di calore geotermica;
- Impianto di ventilazione controllata con recuperatore di calore;
- Building Automation;
- Impianto fotovoltaico in copertura.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione = 164 kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 67 kWh/m²a

SCHEDA N. 13

Nome progetto: **Edificio Liberty**

Luogo: **Padova**

Progetto: **arch. L. Corti e E. Rigano** (Laboratorio di architettura ecologica)

Committenza: **Privata**

“Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni” – Edizione 2010

L'edificio liberty oggetto di riqualificazione e ristrutturazione risale al 1927. È caratterizzato da tre fronti decorati con modanature e cornici, e un prospetto secondario verso il giardino posteriore. Prima dell'intervento l'edificio si presentava in un avanzato stato di degrado, con la necessità di rifare completamente la copertura, e livelli di *discomfort* interno molto elevati. Il progetto è partito con l'obiettivo di ridurre i consumi del fabbricato, nel pieno rispetto degli apparati decorativi di facciata e dei materiali di finitura interna, recuperabili con operazioni di demolizione accurate. L'obiettivo era recuperare anche parte degli infissi originali e le strutture lignee della copertura. I lavori hanno portato alla realizzazione di un cappotto esterno sul prospetto del giardino, con risoluzione dei ponti termici anche degli aggetti (isolamento delle solette dei balconi) e a un cappotto interno per gli altri fronti di pregio. La copertura, completamente rifatta, è stata coibentata e resa ventilata e ospita un impianto fotovoltaico. All'interno è stato previsto un sistema di ventilazione controllata con recupero di calore¹⁶.

Interventi energetici proposti:

- Cappotto esterno sui fronti di pregio, cappotto interno su quello verso il giardino;
- Coibentazione della copertura;

¹⁶ Ulteriori riferimenti: *Premio per l'ottimizzazione energetica* e Corti L., *Ristrutturazione e riqualificazione energetica*, Atti del convegno CasaClima 2011, Bolzano, 2011.

- Ventilazione meccanica con recupero di calore

- Nuovo impianto fotovoltaico in copertura.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione =260 kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 57 kWh/m²a

SCHEDA N. 14

Nome progetto: **Casa 37**

Luogo: **Laudes, Comune di Malles Venosta (Bolzano)**

Progetto: **arch. Christian Kappeller**

Committenza: **Privata**

“Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni” – Edizione 2010

L'edificio è stato edificato nel 1582, e successivamente è stato arricchito da un *erker* (o *bay window* – finestra a golfo, soluzione che estrude, rispetto alla facciata, le finestre verso la strada). Altre modifiche vennero fatte nel 1799. L'unico aspetto rimasto invariato negli anni sono le dimensioni. Durante l'ultima ristrutturazione sono state sostituite le finestre a cassetta originali con altre con profili di uguale spessore e sono state coibentate la copertura, la soletta della cantina e le pareti a contatto col terreno.

L'isolamento termico è stato applicato anche dietro i rivestimenti interni in legno di alcune stanze, mentre si è rinunciato alla coibentazione delle superfici interne dove era preferibile conservare meglio il valore originale. Un nuovo impianto a *pellet* alimenta il riscaldamento a pavimento di tutti i locali con rivestimento in battuto a base di calce, mentre nei locali con il parquet è utilizzato il riscaldamento a battiscopa. Questo particolare accorgimento permette di asciugare i muri esterni, apportando un maggior benessere per l'intera abitazione¹⁷.

Giudizio della giuria:

in questo progetto, conservazione della sostanza storica, architettura ed efficienza energetica vanno di pari passo. Estetica e tutela architettonica non penalizzano il *comfort* abitativo. Dal punto di vista

¹⁷ Ulteriori riferimenti: *Premio per l'ottimizzazione energetica*.

compositivo, si sottolinea tra le altre cose il "mobile, con armadio e wc dell'artista della Val Venosta Esther Stocker. La qualità del restauro e dei nuovi elementi di architettura (ad esempio nel sottotetto) è in genere molto elevata, e crea un ambiente denso, valorizzato dalla vitalità delle superfici.

Interventi energetici proposti:

- Coibentazione della copertura, del solaio a terra e dei muri controterra;
- Nuovo impianto a *pellet* per alimentare pavimento radiante e impianto a battiscopa

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione = 132 kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 65 kWh/ m²a

SCHEDA N. 15

Nome progetto: **Edificio residenziale in via d'Argento**

Luogo: **Comune di Glorenza, Bolzano**

Progetto e concetto energetico: **Arch. Jurgen Wallnöfer**

Indagine conoscitiva: **Dr. Martin Mittermair**

Committenza: **Privata**

"Premio ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni" – Edizione 2010

La casa, verosimilmente risalente al XVI secolo, fu ristrutturata dopo un incendio del 1930. Nel corso dell'ultima ristrutturazione, è stata costruita un'addizione in legno verso il cortile al piano superiore, ed è stata rifatta la carpenteria del tetto. Ad oggi, il sottotetto ristrutturato ospita il soggiorno, mentre le camere sono situate al piano inferiore.

È stato possibile risanare le finestre a cassetta preesistenti. La coibentazione del tetto è stata realizzata con isolamento in lana di pecora, mentre l'utilizzo di pannelli isolati sottovuoto per gli abbaini consente di mantenere le proporzioni slanciate dell'edificio grazie agli spessori ridotti di questa tecnologia. L'utilizzo di legname proveniente dal bosco comunale risponde a criteri di sostenibilità nella scelta dei materiali¹⁸.

Giudizio della giuria:

L'edificio dimostra in modo esemplare che, nel punto di contatto fra tutela architettonica e degli insiemi, è senz'altro possibile realizzare progetti di architettura contemporanea più ambiziosa. Nonostante il

¹⁸ *Ibidem.*

risanamento della facciata con le finestre a cassetta, si è potuto intervenire con maggiore libertà sul lato cortile e negli spazi interni privi di particolari architettonici rilevanti. La scelta di abitare "dall'alto verso il basso" ha consentito di sfruttare tale situazione in modo avveduto, anche dal punto di vista del risparmio energetico. Il grande respiro del volume del soggiorno convince per la sua sobria eleganza, allo stesso modo dello studio dei dettagli architettonici in dialogo creativo con la storia, come ad esempio gli spigoli arrotondati degli spazi, che instaurano una velata analogia con i profili del prospetto. A Glorenza è riuscita la rivitalizzazione di un ensemble in un centro storico, con un'identità nuova grazie a un utilizzo ingegnoso e alcune coraggiose invenzioni architettoniche. Da ogni punto di vista, il progetto merita un premio. Architettura, tutela degli edifici e risparmio energetico interagiscono in maniera esemplare e garantiscono elevata qualità e sostenibilità a questa ristrutturazione.

Interventi energetici proposti:

- Coibentazione della copertura con isolamento in lana di pecora;
- coibentazione abbaini con isolante sottovuoto;
- Addizione lignea.

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento prima della ristrutturazione = 337 kWh/m²a

Fabbisogno termico annuo per riscaldamento dopo la ristrutturazione = 58 kWh/m²a

SCHEDA N. 16

Nome progetto: **Edificio residenziale**

Luogo: Francolino, Ferrara

Progetto: Studio Ekoproget s.r.l.

Anno 2010

Il progetto riguarda la riqualificazione di un edificio residenziale, che per forma architettonica e collocazione geografica, ha avuto nel tempo una destinazione d'uso prevalentemente agricola. L'intervento di riqualificazione ha permesso all'edificio di ospitare, oggi, una residenza e un laboratorio per la produzione e vendita di enzimi corrosivi. Oltre al recupero e risanamento dello stabile, è stato realizzato anche un ampliamento ex novo per collocarvi i servizi mancanti per la nuova destinazione residenziale. Per l'isolamento e l'impermeabilizzazione dell'attacco a terra è stato realizzato un vespaio tradizionale in ghiaione, mentre tutti gli ambienti a terra sono stati isolati con 12 cm di polistirene estruso. Le chiusure

verticali, invece, sono state trattate in maniera differente a seconda delle esigenze dettate dai diversi orientamenti e dai vincoli imposti sull'edificio. La facciata principale non poteva essere modificata per la presenza di lesene e cornici, pertanto si è intervenuti dall'interno con pannelli in silicato di calcio. Sul lato esterno, invece, è stato applicato uno strato di termointonaco per uno spessore di 50-70 mm totali. Sui lati Nord e Ovest si è optato per un isolamento a cappotto in polistirene espanso. L'impianto di riscaldamento è a pannelli radianti a pavimento con sistema a secco (pannelli in fibrogesso). Per la produzione di acqua calda sanitaria sono stati installati 10 m² di collettori solari su una pensilina adibita a parcheggio automobili¹⁹.

Interventi energetici proposti:

- Isolamento interno in polistirene estruso (12cm);
- Isolamento esterno in termointonaco e pannelli di polistirene espanso;
- Impianto di riscaldamento a pannelli radianti;
- Impianto solare per produzione di acqua calda sanitaria installato su pensilina esterna.

Dati di consumo non disponibili

3.2. Valutazione critica dei progetti

3.2.1. Analisi degli interventi di riqualificazione energetica presentati nelle schede

La casistica di interventi proposta ha l'obiettivo di mettere in luce quali siano gli aspetti prevalenti che concorrono alla definizione di un intervento di riqualificazione energetica. Ai fini della tesi di dottorato essa serve, oltre a descrivere lo stato dell'arte, a definire quali siano gli elementi tecnologici costitutivi dell'edificio che risultino maggiormente coinvolti dal progetto di riqualificazione e che concorrano fortemente al miglioramento delle prestazioni energetiche della costruzione. Conoscendo il repertorio di materiali, tecnologie e strategie di intervento a disposizione del progettista è più semplice mettere a fuoco gli aspetti che si ritiene necessario valutare correttamente prima dell'intervento. Pertanto attraverso i progetti presentati si può desumere quale sia l'approccio più comune nella prassi di intervento su un edificio storico. Di seguito sono descritte le principali considerazioni desumibili sinteticamente dall'analisi dei progetti presentati attraverso le schede - progetto.

¹⁹ Ulteriori riferimenti: Brunoro S., *Riqualificazione energetica – architettonica di edilizia storicizzata: un caso di best practice in provincia di Ferrara*, in «Inarcos» (ingegneri, architetti, costruttori), Bologna, Marzo 2011, p. 23.

.....

In primo luogo, risulta evidente come, generalmente, sia preferito dai progettisti un approccio *olistico*, che consideri l'edificio nel suo complesso. Le soluzioni adottate mirano a proporre azioni diverse su ciascuna parte dell'edificio, in modo che la soluzione tecnologica scelta risulti la più adatta per valorizzare l'edificio complessivamente, cercando un compromesso tra ricerca di innovazione e necessità di conservazione, tra istanza di miglioramento prestazionale e vincolo imposto dal fabbricato stesso. Nella maggioranza dei casi, è preferibile prevedere soluzioni a tecnologia mista. Come si è visto nei casi presentati, i progettisti hanno impiegato in uno stesso edificio più soluzioni diverse (cappotto esterno su un prospetto e isolamento dall'interno su un altro, per esempio) per poter sfruttare i maggiori vantaggi possibili di una o dell'altra tecnologia impiegata, in rapporto ai vincoli imposti dall'edificio stesso. Questo approccio risulta interessante quando diventa l'occasione per sperimentare sull'edificio, cercando di mantenere inalterato il valore artistico dello stesso.

La soluzione tecnologica adottata in maniera più diffusa, nonostante le difficoltà imposte dai vincoli di salvaguardia storica e dai problemi di spazio, è, senza dubbio, l'impiego della coibentazione, sia interna sia esterna (nove casi sui sedici presentati, per entrambe le strategie). La caratteristica che accomuna tutti i progetti è la scelta di materiali naturali, che meglio si adattano al rapporto con strutture storiche. Una pratica diffusa è quella di intervenire con nuovi materiali isolanti in copertura (all'intradosso o, sfruttando la necessità di sostituire parti strutturali, dall'esterno rifacendo l'intero sottosistema). Si incontra questa soluzione in sei casi su sedici.

Un'altra scelta ricorrente (cinque casi sui sedici descritti) è quella di intervenire sull'involucro, per migliorarne le prestazioni energetiche, attraverso la giustapposizione di nuovi elementi (serre, doppie pelli o ambienti veri e propri). Questa soluzione, nonostante si ritrovi diffusamente, presenta maggiori difficoltà di integrazione e di ricerca di un linguaggio compatibile con la facciata storica su cui si interviene, ma presenta notevoli vantaggi energetici, perché permette di diminuire lo scambio di calore tra interno ed esterno (e viceversa, in regime estivo), creando uno spazio di filtro, un *buffer* che mitiga la differenza di temperatura tra spazio abitato e l'esterno.

In molti esempi la possibilità di sostituire l'infisso (parte vetrata, telaio o entrambi) può rappresentare una buona scelta per diminuire le dispersioni di calore per ventilazione dovute alla cattiva tenuta di questi elementi (cinque casi dei sedici descritti). Laddove non sia possibile sostituirli integralmente, si può aggiungere un nuovo infisso interno, che non alteri l'immagine del prospetto esterno dell'edificio ma che incrementi le prestazioni isolanti dell'elemento tecnico *finestra*.

Nei casi proposti, per lo più edifici a destinazione residenziale, gli interventi sugli impianti sono stati pochi (aggiunta di una pompa di calore in un progetto, nuovo impianto di ventilazione controllata in quattro casi su sedici, e installazione di caldaie a biomassa in tre situazioni) e di modeste dimensioni, perché non erano richieste prestazioni particolari. Gli interventi si sono concentrati per lo più sul sistema di produzione, attraverso la sostituzione della caldaia originale (se esistente) con una ad alta efficienza.

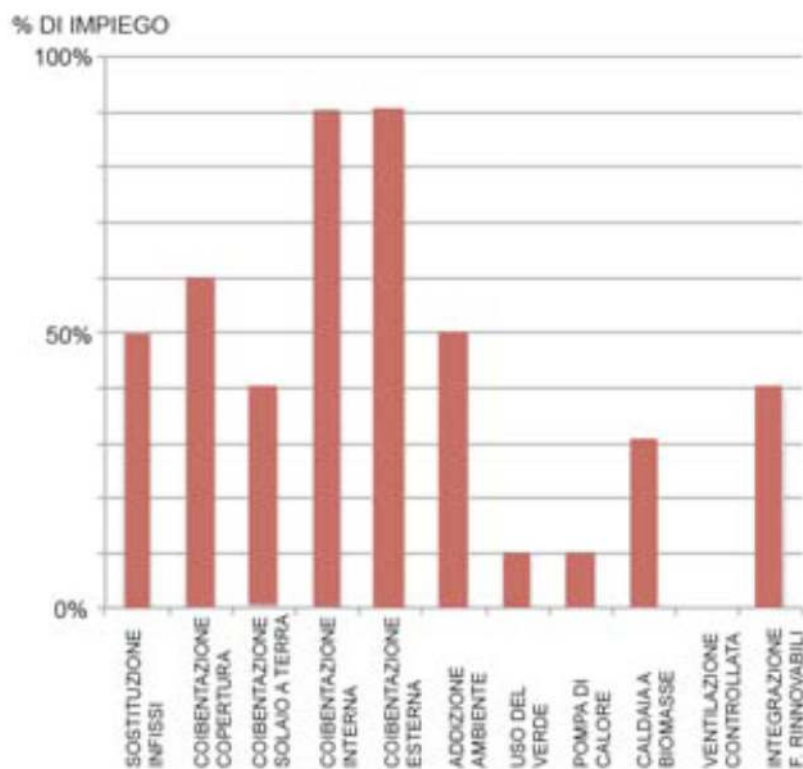


Figura 3.1. Il grafico sintetizza il risultato dell'analisi dei progetti presentati. Si vede chiaramente che la soluzione più diffusa è la coibentazione (a cappotto esterno, interna e di copertura), seguita dalla sostituzione degli infissi e dalla giustapposizione di nuovi ambienti. La percentuale di impegno di sistemi di ventilazione controllata, indispensabili per raggiungere classi energetiche elevate, è qui molto bassa perché i casi studio analizzati sono principalmente a destinazione residenziale, dove questa soluzione risulta ancora generalmente poco vantaggiosa da un punto di vista economico.

L'attenzione prevalente è data all'*involucro*, perché rappresenta, allo stato di fatto, l'elemento caratterizzante l'edificio stesso, essendo portatore dei suoi valori testimoniali e degli apparati decorativi; Allo stesso tempo, nonostante sia la parte dell'edificio dove è più difficile intervenire, è anche la componente che può maggiormente influire sulla prestazione energetica dell'edificio, incidendo molto di

più della componente impiantistica sulla prestazione globale del fabbricato. Per questo, il progetto si concentra sulla ricerca di soluzioni innovative per l'involucro, attraverso le quali valorizzare le caratteristiche che l'edificio ha, date dalla sua conformazione volumetrica e dai materiali di cui è costituito.

Negli esempi proposti vediamo un comportamento energetico dello stato di fatto in media di circa 200 kWh/m²a. Dopo gli interventi, la prestazione energetica dei casi studio migliora di circa il 70%, con un valore medio di 60 kWh/m²a.

3.2.2. Intervento sull'involucro come sistema di riqualificazione energetica dell'edificio storico

Progettare un intervento sull'involucro per gli edifici storici non significa soltanto migliorarne il comportamento energetico, ma anche poter sperimentare soluzioni tecnologiche innovative in un contesto antico; significa mettere in gioco le competenze tecniche dei progettisti a servizio della cultura locale. Esistono, infatti, innumerevoli soluzioni tecnologiche in grado di interfacciarsi con il paramento murario di valore testamentario in maniera rispettosa, senza perdere di vista l'obiettivo principale di innalzamento prestazionale. Poter controllare il *comfort* interno di questi locali non vuol dire solo risparmiare in termini economici, ma offre anche la possibilità di incentivare un nuovo ciclo di vita del contenitore storico.

Le principali soluzioni per realizzare una "nuova pelle" per l'edificio storico possono essere divise in due categorie, che si distinguono per tipologia di applicazione. Ci sono interventi che agiscono sulla stratigrafia del pacchetto di chiusura verticale o orizzontale e opere di giustapposizione al fabbricato esistente di elementi o volumi di nuova progettazione, come si vedeva nell'analisi presentata nel paragrafo precedente.

La prima possibilità è la più frequente e maggiormente percorribile per questioni economiche, ma presenta non poche difficoltà: in primo luogo è necessario stabilire in quali termini sia possibile ripensare la stratigrafia originale, considerando la soluzione dell'isolamento a cappotto esterno o interno. La scelta fra le due opzioni dipende dal compromesso possibile fra migliore soluzione in termini di performance tecnologica e le libertà di intervento che il valore del paramento murario consente.

L'applicazione di un cappotto isolante rappresenta la soluzione migliore per quanto riguarda il controllo invernale. Tale soluzione permette di controllare le dispersioni di calore tra interno ed esterno e la formazione di condensa o umidità interstiziale, fenomeno assai plausibile in contesti storici dove le murature hanno assorbito nel tempo notevoli quantità di acqua. Questa ipotesi è ragionevole nei casi in cui i paramenti murari non presentino allo stato di fatto apparati decorativi significativi. In queste condizioni la realizzazione del cappotto si sposa perfettamente con le comuni operazioni di manutenzione della

.....

facciata e dei materiali di finitura esterna. L'operazione più delicata, pertanto, rimane la scelta del tipo di isolante. Sono di norma preferibili prodotti naturali che si rapportino meglio con i materiali della tradizione. In molte culture locali, il rivestimento di facciata era l'intonaco; pertanto, una buona soluzione è mantenere la medesima finitura superficiale, evoluta tecnologicamente. Una possibilità è rappresentata dall'intonaco minerale termoisolante a base di calce idraulica che garantisce un miglioramento della prestazione energetica della parete dell'ordine del 40%²⁰ a fronte di spessori molto ridotti. Questa soluzione permette di non alterare l'immagine originale della facciata. L'aspetto materico è il medesimo e il rapporto pieni/vuoti tra l'imbotte delle aperture e le superfici opache non varia di molto rispetto all'originale. Un'alternativa è quella di usare isolanti naturali con spessori maggiori ma con finitura comunque intonacata. Ne sono un esempio, gli isolanti in fibra di pecora, di cellulosa o di cocco, la canapa o il lino, materiali adatti all'applicazione su murature antiche perché naturali e traspiranti. Attingendo direttamente nella tradizione è possibile realizzare cappotti esterni con incannicciati in canna palustre e finitura in coccio pesto o argilla. Questa soluzione è preferibile per le architetture tipiche del Mediterraneo, che tradizionalmente tramandano un linguaggio architettonico legato a questi materiali. Bisogna essere più accorti, invece, nel proporre soluzioni simili in contesti sbagliati; il fatto che siano materiali naturali e con radici nel lontano passato non significa che possano essere applicate in qualsiasi contesto geografico e culturale.

Un'opzione diffusa è quella di utilizzare la fibra di legno che, con spessori di 8-10 cm, migliora notevolmente il comportamento energetico della parete²¹. A differenza del termointonaco, che permette di ottenere una finitura superficiale non perfettamente complanare, a ricordo delle imprecisioni tecnico-realizzative tipiche della facciata originale, il risultato finale è di una parete più precisa e regolare.

Non sempre, però, è possibile intervenire facilmente dall'esterno. Nella maggior parte dei casi è necessario prevedere un nuovo isolamento dall'interno, per non perdere apparati decorativi o rilievi di facciata dovuti a cornici e cornicioni, rinunciando alle prestazioni del cappotto. Anche in questo caso ci si affida generalmente agli isolanti naturali citati in precedenza, ma è possibile attingere anche a un più vasto repertorio di materiali di recente concezione. Questi prodotti si adattano bene all'applicazione in

²⁰ Il Termointonaco minerale a base di calce idraulica naturale è certificato con valori di conduttività termica λ pari a 0,05 – 0,07 W/mK. Generalmente si applica con spessori 2 - 6 cm, a seconda che venga accoppiato ad un cappotto tradizionale o come unico isolamento esterno.

²¹ Il valore di *lambda* della fibra di legno è circa 0,03 – 0,04 W/mK e generalmente si applica in pannelli da 4-12 cm per avere un buon rapporto prezzo/prestazione. Applicando un cappotto in fibra di legno la trasmittanza della parete diminuisce del 30-50% a seconda degli spessori in gioco.

contesti storici per i loro spessori particolarmente ridotti. Tra i più interessanti ricordiamo gli isolanti riflettenti multistrato e gli isolanti sottovuoto²². Le prestazioni energetiche dei materiali più innovativi sono molto buone e spesso sufficienti a giustificare la tipologia di intervento e il costo per la realizzazione della modifica. Bisogna, però, essere consapevoli della scelta: la stratigrafia della chiusura originale sarà alterata dalla presenza di materiali completamente nuovi e sintetici, che difficilmente permettono di ottenere un linguaggio architettonico simile a quello autentico.

Nei casi in cui non sia possibile intervenire sulle componenti di involucro verticali (sia in esterno sia sul lato interno) una soluzione è coibentare la copertura, sia in intradosso sia, rifacendo l'intero sistema di chiusura orizzontale, dall'esterno. Anche per questa soluzione la scelta del materiale è strategica, se si vogliono ridurre gli spessori ed evitare formazione di condensa. La scelta ricade tra i materiali citati in precedenza, sia naturali sia artificiali. Questa strategia dà un beneficio sensibile alla prestazione dell'edificio senza stravolgere la consistenza originale della facciata e, se si interviene dall'interno, anche l'altezza di gronda del fabbricato (spesso vincolata insieme agli apparati decorativi).

La difficoltà maggiore, nell'intervento sul fabbricato storico va oltre la sola scelta del materiale più appropriato. Nella maggior parte dei casi, infatti, la conformazione dell'edificio non permette di scegliere una sola soluzione tra quelle proposte e il progettista è costretto a impiegare accorgimenti alternativi con interventi misti e puntuali (si veda *paragrafo 3.2.1*).

In molti dei progetti proposti in precedenza si è analizzato il contributo, sul comportamento energetico dell'edificio, di interventi sull'involucro, diversi a seconda del prospetto o dell'elemento tecnico che il progettista proponeva di modificare.

Un esempio interessante di questo approccio è la riqualificazione dell'edificio residenziale di Bolzano²³ visto in precedenza (scheda n. 2), per il quale sono state utilizzate soluzioni differenti a seconda dei fronti dell'edificio: sul fronte secondario a Nord è stato realizzato un cappotto in fibra di legno di 10 cm e finitura in intonaco termoisolante di 2 cm, mentre sulla facciata principale si è optato per un cappotto interno in fibra di legno e finitura in terra cruda. Anche lo studio progettuale per la riqualificazione energetica del

²² Gli isolanti multistrato sono isolanti sottili di derivazione Aerospaziale, a spessore ridotto (da 7 a 30 mm) costituiti dall'unione di pellicole di materiale riflettente ed elementi isolanti combinati (ovatta, schiume, lana di pecora, ecc.). Sono molto indicati per risolvere applicazioni complesse, come il nodo parete controsoffitto nel caso di morfologie curve o dove c'è poco spazio. Presentano valori di conduttività pari a 0,16 W/mK per 6 cm di spessore (2 cm di strati isolanti installati tra due lame d'aria di 2 cm). Anche gli isolanti sottovuoto hanno un elevato potere isolante con uno spessore molto ridotto: λ di 0,004 W/mK per 2-4 cm di spessore. Le controindicazioni di tali materiali sono il costo superiore e, nel caso degli isolanti sottovuoto, una maggiore delicatezza.

²³ Casa in via dei Vanga, Bolzano: progetto dell'architetto Dietmar Dejori, Bolzano. L'edificio è sottoposto a vincolo di tutela da parte della Soprintendenza.

.....

complesso di S. Antonio in Polesine a Ferrara (scheda n. 10) propone l'adozione di diverse soluzioni in un unico contenitore. I prospetti che si affacciano sul chiostro (attribuiti all'architetto G.B. Aleotti) presentano, oltre a un vincolo di tutela, una serie di modanature che si rapportano ai portici sottostanti che hanno imposto l'intervento dall'interno. Nello studio sono state messe a confronto diverse soluzioni, tradizionali e innovative che permettono di ridurre sensibilmente la trasmittanza della parete.

Sul prospetto secondario a Nord Ovest, invece, è stato ipotizzato l'uso di intonaco termoisolante che con 6 cm di spessore riduce la trasmittanza da 1,54 W/mqK a 0,66 W/mqK.

Come si è visto nell'intervento proposto dall'architetto Tribus per l'ex edificio postale di Bolzano (scheda n. 4), un nuovo strato isolante esterno permette di elaborare un rinnovato linguaggio morfologico-espressivo del complesso.

Intervenire sull'involucro per migliorarne l'efficienza energetica non significa soltanto aumentarne o migliorarne il sistema isolante. Si può decidere di operare anche sulla massa per aumentarne l'inerzia termica (per un comportamento estivo migliore) o per ragioni estetiche che si coniughino con gli aspetti prestazionali.

Una strategia interessante consiste nell'integrazione di elementi vegetati, sia sulla facciata esterna dell'edificio, sia in ambiente interno o di filtro.

Una nuova, o forse ritrovata, frontiera dell'architettura sostenibile è rappresentata, infatti, dall'utilizzo della vegetazione come strumento di controllo della qualità dell'aria. L'uso di "elementi verdi" permette di creare uno spazio controllato energeticamente attraverso un sistema naturale. La presenza della vegetazione consente di aumentare le capacità termiche delle chiusure verticali ed orizzontali, contribuendo, in parallelo, al miglioramento della qualità dell'aria e del microclima. Tramite l'evaporazione sulla superficie delle foglie le piante regolano l'umidità dell'aria e contribuiscono al raffrescamento degli ambienti. Sulle superfici delle foglie evapora l'acqua e si produce energia rinfrescante. Oltre a questo, le radici e tutti i microrganismi che le vivono, funzionano come un'ampia superficie di pulizia con elevata efficienza in relazione alle modeste dimensioni di scambio con l'ambiente. A questo vanno aggiunti gli effetti positivi derivanti dalla produzione di ossigeno attraverso la fotosintesi clorofilliana.

L'azione delle piante non è limitata ad una percezione soggettiva, ma queste agiscono in modo determinante sulle condizioni degli ambienti interni: assorbimento del suono, riduzione delle sostanze nocive nell'aria, assorbimento della polvere.²⁴

²⁴ Per studi sull'integrazione del verde verticale in architettura si faccia riferimento a: Frantz J., *Grüne Klimaanlagen*, atto del convegno Casaclima, Bolzano, 2008.

Un esempio di questo sistema è riscontrabile nel progetto per il restauro scientifico dell'ex Monastero Cistercensi di Santa Lucia a Faenza²⁵ (scheda n. 11). L'intervento prevede, oltre alla posa di un cappotto esterno, la realizzazione di una struttura per la crescita di verde verticale per formare una contro parete ventilata, rilettura morfologica del tradizionale verde rampicante. È, inoltre, possibile realizzare pareti verdi vere e proprie anche per conferire alla facciata un linguaggio architettonico naturale con un sistema che cambia nel tempo ed è reversibile.

La progettazione di elementi naturali si integra molto spesso con il secondo metodo di intervento sull'involucro storico: la giustapposizione di nuovi spazi. La soluzione più diffusa è la progettazione di spazi vetrati di filtro tra interno ed esterno: consiste nel isolare gli edifici storici con l'aggiunta di "cuscinetti" più o meno estesi che riducono la differenza di temperatura a cui sono sottoposte le chiusure storiche. Questi sistemi, inoltre, servono per dotare gli edifici di nuovi servizi (più frequente è il caso dell'aggiunta di nuovi spazi di distribuzione, spesso mancanti in questi contesti o non rispondenti alle necessità imposte dal nuovo uso) organizzati in maniera più razionale, sfruttando la trasparenza del vetro per non perdere la vista della facciata storica. Il nuovo "ambiente isolante" si configura come uno spazio a temperatura controllata (più calda d'inverno e più fresca d'estate) che consente di diminuire sensibilmente le dispersioni di energia (termica o frigorifera) tra interno ed esterno.

L'involucro vetrato può essere costituito da lastre con rivestimento interno bassoemissivo, ancorate a un sistema di infisso "a ragno" (a sua volta sorretto da montanti in vetro strutturale) come si vede nel progetto dell'arch. Belpoliti per Villa del Foro ad Alessandria (scheda n. 12). Ciò permette di ottenere una trasparenza quasi totale che consente di massimizzare la percezione del manufatto storico retrostante.

L'installazione di un sistema tecnologico simile, che avvolge il volume storico originale, incrementa le prestazioni energetiche del pacchetto tecnologico di chiusura verticale. Le chiusure che confinano con questo tipo di ambiente non necessitano dello stesso trattamento isolante di quelle affacciate direttamente sull'esterno e permettono al progettista di preservare la stratigrafia originale del manufatto.

Un altro esempio di tale strategia è il progetto per l'O. T. Theater, di Franz Ziegler, dove la sede di un vecchio teatro di Rotterdam è stata recuperata attraverso la sovrapposizione di un involucro vetrato con funzione di controllo energetico.

Blanc P., *Vertical garden*, www.verticalgardenpatrickblanc.com, 2008.

²⁵ Progetto: A+4 Studio, Faenza, arch. P. Rava.

Il monastero risale al '700 ed è sottoposto a vincolo della Soprintendenza che ha accettato l'intervento. Esso prevede la posa di un cappotto esterno in canniccato palustre con finitura con intonaco di coccioposto.

Un elemento importante di intervento, al di là dei materiali che compongono l'involucro, è rappresentato dai serramenti, sia nella parte vetrata sia in quella opaca. Caso per caso, è necessario valutare la possibilità di mantenere gli infissi antichi, se di valore storico, sostituendo, per esempio, il vetro con uno nuovo più performante. Se la finestra nel suo insieme rappresenta un elemento "intoccabile" è possibile allora aggiungere un nuovo serramento all'interno, lasciando un'intercapedine tra i due componenti. In caso di sostituzione integrale dell'infisso le scelte offerte dal mercato oggi sono amplissime (per i vetri come per i profili). È cura del progettista valutare le dimensioni del nuovo profilo rispetto a quello sostituito e allo spazio a disposizione, oltre alla scelta del materiale più idoneo al contesto culturale in cui viene installato.

INVOLUCRO CHIUSURE VERTICALI 	A	ISOLAMENTO ESTERNO/INTERNO		<ul style="list-style-type: none"> - Scelta del tipo di materiale: naturale o sintetico - Legame con la cultura costruttiva del luogo - Scelta del tipo di soluzione tecnologica in relazione al livello di compatibilità con il linguaggio architettonico della facciata - Valutazione della compatibilità con l'edificio storico - Controllo ambientale attraverso nuovi ambienti - Integrazione fonti rinnovabili senza interferenze con il corpo edificio originale - Sostituzione integrale o parziale (telaio e/o vetro) - Aggiunte (finestra doppia, elementi oscuranti...) - Integrazione fonti rinnovabili
	B	PARETI VENTILATE E DOPPIE PELLI		
	C	GIUSTAPPOSIZIONE DI NUOVI AMBIENTI O VANI TECNICI		
	D	SERRAMENTI		
	E	INTEGRAZIONE DELLE SOLUZIONI A, B, C, D		
CHIUSURA SUPERIORE 	A	ISOLAMENTO ESTERNO/INTERNO		<ul style="list-style-type: none"> - Scelta del tipo di materiale: naturale o sintetico - Valutazione dell'intervento in relazione all'altezza del fronte - Fotovoltaico semitrasparente, microciclo, collettori solari per acqua calda sanitaria, geotermia - Valorizzazione della capacità isolante e rinfrescante dei sottotetti (Buffer superiori)
	B	INTEGRAZIONE FONTI RINNOVABILI		
	C	CONTROLLO AMBIENTALE (sottotetto)		
	D	INTEGRAZIONE DELLE SOLUZIONI A, B, C		
CHIUSURA INFERIORE 	A	ISOLAMENTO ESTERNO/INTERNO		<ul style="list-style-type: none"> - Scelta del tipo di materiale: naturale o sintetico - Rifacimento integrale o parziale - Valutazione dell'intervento in relazione alle altezze interne originali - Valorizzazione della capacità isolante e rinfrescante dei solai a terra (Buffer inferiori)
	B	CONTROLLO AMBIENTALE (solai con voltine)		

Tabella 3.1. Schema delle principali strategie di intervento per la riqualificazione di un edificio storico attraverso la valorizzazione dell'involucro, in funzione della tipologia di intervento e/o dello scopo ultimo dell'operazione.

3.2.3. Integrazione del sistema impiantistico nel contenitore storico

Il tema della rifunzionalizzazione di un edificio storico richiede spesso grandi sforzi progettuali per adattare gli spazi e la morfologia esistente alle nuove funzioni richieste dal nuovo uso contemporaneo.

Oltre alla valorizzazione degli ambienti e al consolidamento delle strutture, non si può prescindere dalla progettazione di un opportuno sistema impiantistico che permetta il normale svolgersi delle attività, qualunque scelta conservativa o destinazione d'uso si pensi per il fabbricato. In molti casi, quando si parla di edilizia tutelata, si fa riferimento a edifici destinati al terziario e ad attività speciali, come edifici per uffici, musei, teatri o strutture ricettive, che richiedono sistemi particolari per la gestione del *comfort* termoigrometrico e acustico.

Riqualificare un edificio storico per accogliere al suo interno nuove attività significa farlo rientrare in un circuito d'uso moderno e, così, preservarlo nella memoria di tutti evitando che si trasformi soltanto in un museo di sé stesso. Perché questa operazione abbia successo, è indispensabile che il fabbricato venga adeguato alle richieste di climatizzazione interne che oggi sono fondamentali per il corretto svolgimento di qualsiasi attività umana. Tra l'altro, spesso, controllare la qualità e la temperatura interna dell'aria in edifici di questo tipo significa favorire anche la conservazione degli apparati decorativi che li contraddistinguono e che ne innalzano la qualità architettonica. Quando non sono solo i decori degli edifici a dover essere salvaguardati ma anche opere artistiche in esso sono conservate, è richiesto di progettare con attenzione impianti di condizionamento dell'aria particolarmente sofisticati. Perciò, anche se è recente l'esigenza di soddisfare le richieste della normativa in tema di risparmio energetico,²⁶ la necessità di prevedere un impianto all'interno degli edifici storici è ben consolidata nel tempo. La differenza è che ai sistemi minimi di garanzia di un determinato livello di *comfort* si sono sommate complesse esigenze specifiche di efficienza energetica.

Le principali criticità legate a questa nuova necessità sono da imputare per lo più alla difficoltà di integrare gli impianti necessari alla sua struttura, in particolare se si tratta di progettazione *ex novo* della componente impiantistica e non solo dell'adattamento di quella originale.

Progettando nel contenitore storico è necessario scegliere l'impianto in base al suo grado di integrabilità con il manufatto, senza necessariamente cercare di occultare completamente i componenti nell'involucro edilizio. Si possono, infatti, prevedere sistemi "a vista" che si relazionino opportunamente con il contesto. Intervenire su un fabbricato storico non significa inevitabilmente arrendersi di fronte al confronto antico-

²⁶ Si veda capitolo 2 paragrafi 3 e 4 per i riferimenti normativi.

moderno senza poter raggiungere risultati paragonabili alla nuova costruzione.

Gli edifici storici si presentano a noi ricchi di “proto-impianti di condizionamento passivo”, come i camini di ventilazione o i buffer rappresentati dai sottotetti, dalle cantine interrato o dai granai delle cascine di campagna²⁷. La presenza in tali fabbricati di antichi sistemi di condizionamento fa sì che essi nascondano moltissimi spazi, anche non di pregio, che possono diventare utilissimi luoghi di integrazione e distribuzione delle canalizzazioni dei terminali impiantistici. Per questa ragione è necessario vagliare caso per caso le opportunità di integrazione, dopo un attento studio dell'edificio e della sua storia.

Impianti per il condizionamento estivo e invernale

Disponendo di un vano tecnico per collocare il sistema di produzione dell'energia termica, il problema maggiore nella scelta dell'impianto di condizionamento consiste nella collocazione dei terminali impiantistici negli ambienti di emissione. La soluzione più efficace, sia da un punto di vista energetico, sia da un punto di vista conservativo, è rappresentata dalla possibilità di celare completamente alla vista questi elementi, realizzando pareti o pavimenti radianti, nascosti nell'involucro edilizio.

Questa soluzione è plausibile nel momento in cui si disponga di superfici non di pregio, realizzate con intonaci non decorati, senza tracce significative di preesistenze, o pavimenti nel tempo sostituiti o degradati. Approfittando della necessità di consolidare la struttura dei solai, e con spessori sufficienti, è possibile ripensare la stratigrafia originale utilizzando, per esempio, pannelli multistrato, composti da una lastra in cartongesso o fibrogesso, all'interno della quale sono alloggiati i circuiti a serpentina in polietilene. Questo sistema permette di installare un impianto a ridotto spessore (nell'ordine dei 2-3 cm) che non pregiudica l'altezza interpiano originale e lo spessore complessivo del solaio, oltre a non aumentare i carichi imposti alla struttura storica. I sistemi radianti offrono un significativo risparmio energetico perché lavorano a temperature fino a 20 gradi più basse dei terminali tradizionali. Per questa ragione, il sistema si sposa perfettamente con impianti per la produzione di energia termica e frigorifera ad alta efficienza energetica; in particolare con caldaie a condensazione con recupero di calore (emissione di fumi a bassa temperatura, adatta al contatto con le strutture lignee), che occupano lo spazio di una caldaia tradizionale; ma anche con sistemi basati sull'utilizzo di pompe di calore che con un solo sistema permettono la produzione di energia termica e frigorifera²⁸. Ottima è la soluzione della pompa di calore geotermica che

²⁷ Si rimanda a: Pietromaria Davoli, “Il restauro energetico-ambientale degli edifici storici. Un percorso progettuale fra costruzioni tutelate e tecnologie innovative, fra antichi saperi e concetti evoluti”, in “L'ufficio tecnico”, n. 4/2007, p. 27-36.

riesce a sfruttare la presenza di vasti spazi verdi, generalmente presenti nei lotti di edifici storici, per nascondere l'apparato di produzione di calore dell'impianto, anche quando di tipo superficiale. Il sistema si adatta bene al caso di un edificio privo di impianti (caso frequente nella riqualificazione di un edificio antico), perché permette di installarne uno di nuova progettazione senza prevedere l'allacciamento alla distribuzione di gas (se si prevede una pompa di calore elettrica) e la canna di esalazione dei fumi. Questo consente ovviamente di evitare il complesso problema del passaggio da un piano all'altro di canalizzazioni di grandi dimensioni.

Le taglie di questo sistema sono diverse a seconda delle dimensioni dell'edificio; in base alla disponibilità di spazio per il vano tecnico si può optare per il sistema monoblocco che raccoglie tutti i componenti in un unico vano o il sistema multiplo che separa l'unità esterna dai sistemi di emissione, che quindi diventano piccoli mobiletti da collocare direttamente nei locali da climatizzare. Il sistema funziona in modo ancor più vantaggioso se accoppiato all'impianto di ventilazione meccanica controllata a recupero di calore perché sfrutta l'aria viziata estratta per alimentare l'impianto di condizionamento, riducendo la necessità di altri terminali impiantistici.

Nel caso, invece, vi sia già un impianto che va trasformato perché desueto, la soluzione della pompa di calore elettrica richiede un impegno economico maggiore, dato dalla necessità di ristrutturare interamente gli impianti termici ed elettrici.

La presenza di un impianto di teleriscaldamento cittadino²⁹ è un'altra importante opportunità per risparmiare energia realizzando un sistema a ridotto impatto spaziale; non ha bisogno di un vero e proprio vano tecnico, ma soltanto dello spazio per lo scambiatore di calore ed elimina le canne fumarie, spesso difficilmente collocabili sulle coperture storiche per la difficoltà negli attraversamenti interpiano.

Prevedere solo impianti di climatizzazione ad acqua può essere, in certi casi, l'unica possibilità, ma non permette di controllare l'umidità dell'aria; molto spesso gli edifici storici sono destinati a funzioni pubbliche, pertanto è preferibile l'accoppiamento con un sistema di ventilazione controllata. Nei casi di immobili di particolare pregio, l'impianto, deve diventare lo strumento per la protezione del manufatto stesso e dei suoi apparati decorativi.

²⁸ La pompa di calore, secondo la definizione riportata all'art. 2 della Direttiva 2002/91/CE, è un dispositivo che sottrae calore a bassa temperatura dall'aria, dall'acqua o dal suolo e lo trasferisce all'impianto di riscaldamento di un edificio. Il processo può essere invertito per il raffrescamento estivo.

²⁹ Il teleriscaldamento è una forma di riscaldamento che consiste nella distribuzione, attraverso una rete di tubazioni isolate e interrate, di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore (detti fluido termovettore), proveniente da una grossa centrale di produzione, con successivo ritorno alla stessa centrale.

Un impianto ad aria, sia per la climatizzazione degli ambienti, sia per la ventilazione meccanica, rappresenta la soluzione più efficace per integrare due impianti in un unico sistema. L'integrazione degli elementi di questo impianto è, però, piuttosto complicata per le grandi dimensioni delle canalizzazioni e dipende fortemente dalle situazioni specifiche in cui si opera, per cui è difficile definire un approccio valido in ogni situazione.

In generale, è necessario predisporre un locale o un vano in cui alloggiare l'unità di trattamento d'aria (UTA) che non può essere collocata troppo lontano dagli ambienti da climatizzare per non allungare i canali di distribuzione dell'aria³⁰. La soluzione più semplice è quella di creare degli appositi controsoffitti nei vani di servizio (p. e. servizi igienici e corridoi). In questo modo è possibile concentrare gli apparati più rumorosi negli ambienti meno pregiati e limitare la corsa dei canali, creando delle bocchette di immissione ed estrazione nella parete di divisione di questi ambienti con quelli di maggior pregio. Un'altra possibile soluzione è quella di utilizzare i cavedii presenti nel fabbricato celati alla vista da apparati fittizi. Esiste, infatti, la possibilità di sfruttare i vuoti presenti nelle murature che portano alle canne fumarie degli antichi camini. Spesso la presenza di questi "impianti di riscaldamento" è ancora evidente come traccia sulle pareti. Attraverso l'uso di termo camere o piccoli sondaggi, è possibile ritrovare gli antichi tracciati e riutilizzarli per funzioni simili, reinterpretate in chiave moderna. Pratica diffusa, invece, è utilizzare i cavedii formati dalle volte lungo il perimetro degli ambienti, per nascondere nei solai le canalizzazioni, realizzando bocchette di ventilazione a terra. Questa soluzione permette di rimuovere solo una parte della pavimentazione, lasciando intatta la quasi totalità del solaio.

Se gli edifici sono già dotati di un impianto di riscaldamento, aggiunto in epoche più recenti, si può sfruttare la presenza dei condotti già installati nei solai per sostituire i terminali con elementi più efficienti e moderni. Una buona soluzione è rappresentata dai ventilconvettori che utilizzano i normali circuiti idraulici esistenti e permettono di condizionare gli ambienti e controllare l'umidità dell'aria, sia nel periodo invernale sia in quello estivo (inserendo la rete, seppure di piccola dimensione, del recupero della condensa). Gli elementi di questo sistema hanno, oggi, un design più curato e un'estrema libertà di installazione: orizzontale a soffitto, in vista o canalizzati. Gli elementi in vista possono essere integrati in nuovi elementi di arredo o seduta oppure essere incassati a parete.

³⁰ Le dimensioni di un'unità di trattamento aria (U.T.A.) variano in base alla portata d'aria (mc/h) necessaria per ciascun vano, in relazione al volume degli ambienti e al numero di ricambi d'ora previsti. Per un edificio di 2000mq le dimensioni della macchina variano tra 30-60 cm di larghezza e 60-150 cm di lunghezza; pertanto è collocabile all'interno di controsoffitti, sottotetti o vani pensati *ad hoc*. Le canalizzazioni vengono calcolate secondo la formula: $S = V / (\omega \times 3600)$ con ω (velocità dell'aria) = 2 m/s, S = sezione del canale e V = portata d'aria totale e le sezioni si attestano circa tra i 50 e i 100 cm.

Impianti elettrici

La realizzazione di impianti elettrici negli edifici storici ha una storia più lunga rispetto a quella degli impianti termici perché l'esigenza di portare la luce negli edifici ha radici più antiche e riconosciute rispetto alla necessità di controllare il *comfort indoor* e il bilancio energetico dei fabbricati. A ciò vanno aggiunte la maggiore facilità di integrazione dei cavi e la necessità di vani tecnici con dimensioni più ridotte. Nonostante questo, in molte situazioni, la presenza di superfici interne con decorazioni di pregio ostacola le normali operazioni di installazione delle canalizzazioni elettriche. In questi casi è possibile creare i punti luce e le derivazioni a pavimento, facendo passare i cavi elettrici all'interno della stratigrafia del solaio (in caso di riqualificazione delle strutture e delle finiture) o nel vuoto delle volte, prevedendo opportune botole di ispezione. Gli elementi di emissione della luce diventano, invece, un vero e proprio campo di sperimentazione progettuale; si possono prevedere sistemi a terra, indipendenti dalle facciate interne, reversibili e adattabili alle diverse situazioni di progetto.

Una grande innovazione nel campo illuminotecnico è rappresentata dall'utilizzo della tecnologia a led, sempre più impiegata anche in contesti antichi.

Le potenzialità di questa tecnologia sono note da tempo per l'applicazione in altri campi, diversi da quello "architetturale" (telecomandi a infrarossi, lampadine spia, display LCD, ecc.). La principale caratteristica dei led è quella di saper esprimere la luce in molti modi diversi, consentendo di progettare la luce e l'edificio insieme ad essa, attraverso l'installazione di apparecchi di ridotte dimensioni. I vantaggi offerti dalla tecnologia Led sono importanti anche per quanto riguarda il risparmio energetico e la manutenzione. La potenza del led sta nella capacità di trasformare quasi tutta l'energia impiegata in luce, con un alto livello di efficienza. Il poco calore (intorno a 120 gradi) è prodotto posteriormente, in un punto molto limitato, nella zona intermedia retrostante fra gli strati del diodo. Questo permette di installare la fonte luminosa anche in luoghi "difficili" e integrarla all'architettura stessa predisponendo un dissipatore nella parte retrostante. Per tutte queste caratteristiche il Led è particolarmente adatto all'illuminazione di edifici storici: le ridotte dimensioni permettono l'integrazione in contesti di pregio (sopra ai cornicioni per esempio), la caratteristica di non surriscaldarsi consente l'installazione anche vicino ad apparati lignei e le buone prestazioni luminose sono in grado di valorizzare i rivestimenti e le decorazioni di facciata senza alterarne i colori originali.

Impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili

L'integrazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili (impianti fotovoltaici, solare termico e eolico) rappresenta la vera sfida progettuale degli ultimi anni. L'atteggiamento da mantenere in questa situazione è di assoluta prudenza e attenzione nei confronti del rapporto formale e tecnologico di questi elementi con il contenitore storico. L'integrazione in copertura, per esempio, rappresenta una soluzione plausibile perché nasconde, almeno apparentemente, il sistema dalla vista dei fronti, ma rappresenta spesso un problema tecnico. La sostituzione di alcuni elementi di rivestimento della copertura per fare spazio alle celle, pone il problema della formazione di ponti termici fra esterno ed interno, oltre al pensiero di sostituire elementi originali storici con materiali moderni³¹. Una possibilità è ricercare il dialogo in maniera manifesta attraverso l'utilizzo delle superfici vetrate, (sostituibili con celle di fotovoltaico semitrasparente o gel fotovoltaico) o con la progettazione *ex novo* di elementi architettonici da giustapporre al fabbricato storico³². La creazione di gallerie vetrate, passaggi esterni o seconde pelli con superfici captanti si prefigura come soluzione all'integrazione degli impianti perché non interagisce sostanzialmente con l'involucro edilizio e crea nuove superfici omogenee con un linguaggio fortemente innovativo.

³¹ Si rimanda a: Benatti F., "L'integrazione dei terminali impiantistici sulle coperture. Indicazioni metodologiche e progettuali per la definizione di interventi coerenti con il contesto urbano e ambientale", tesi di Dottorato di Ricerca in ICAR/12 – Tecnologia dell'architettura, XVII ciclo. Università di Ferrara - Facoltà di Architettura, Università IUAV di Venezia – Facoltà di Architettura, Ferrara, 27 marzo 2006. Tutor: P. Davoli.

³² Si rimanda a : Belpoliti V., Bizzarri G., Calzolari M., *La trasmissione di calore attraverso sistemi fotovoltaici semitrasparenti integrati: valutazioni preliminari in regime dinamico su due casi studio dell'area ferrarese*, Atti del IV Congresso Nazionale AIGE, Roma 26-27 Maggio 2010.

TERMICO 	A SOSTITUZIONE DELL'IMPIANTO ESISTENTE 	Scelta di sistemi integrabili nell'ambiente storico
	B PROGETTAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO SE NON PREESISTENTE 	Scelta di sistemi alimentati a acqua o aria Sistemi di generazione: - caldaia a condensazione; - pompa di calore (elettrica o geotermica); - biomassa; - solare (fotovoltaico o termico); - geotermia; - microciclo integrato;
	C INTEGRAZIONE IN AMBIENTE DI PREGIO 	Progettazione di sistemi ad hoc per il contesto di inserimento
ELETTRICO 	A SOSTITUZIONE DELL'IMPIANTO ESISTENTE 	Scelta di sistemi integrabili nell'ambiente storico
	B PROGETTAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO SE NON PREESISTENTE 	Scelta di sistemi ad alta efficienza e bassi consumi (per esempio illuminazione LED)
	C INTEGRAZIONE IN AMBIENTE DI PREGIO 	Progettazione di sistemi ad hoc per il contesto di inserimento
VENTILAZIONE MECCANICA 	A PROGETTAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO 	Integrazione dei componenti del sistema (a vista o in controsoffitti)
	B INTEGRAZIONE IN AMBIENTE DI PREGIO 	Progettazione di sistemi ad hoc per il contesto di inserimento

Tabella 3.2. Schema delle principali strategie di intervento per la riqualificazione di un edificio storico attraverso la componente impiantistica, in relazione alla tipologia di intervento e allo scopo dell'operazione.

CAPITOLO 4. Ricerche nazionali orientate alla definizione di linee guida e buone pratiche per il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico

Questo secondo capitolo dello stato dell'arte ha la finalità di presentare le ricerche volte alla definizione di linee guida di intervento per la riqualificazione energetica degli edifici storici. La descrizione di tali studi mette in evidenza la mancanza di indicazioni specifiche per quanto riguarda il metodo di valutazione dello stato di fatto energetico e la condivisa necessità di affiancare allo studio di corrette strategie di intervento un metodo specifico per descrivere il comportamento energetico degli edifici in esame, prima ancora della riqualificazione.

4.1. Ricerche

Molteplici sono gli sforzi dedicati oggi all'intervento sugli edifici storici, a livello di progetti veri e propri. Alle spalle di questa sperimentazione sul campo, però, manca un substrato di conoscenze consolidato, derivante dalla ricerca. Soltanto in questi ultimi anni gli enti di ricerca e le università stanno mettendo a punto studi sull'argomento per dare una risposta ad un'esigenza del mercato sempre più incalzante. Questa è la ragione per cui lo stato dell'arte per quanto riguarda il tema della riqualificazione energetica dell'edilizia storica è in costante mutazione e aggiornamento.

In particolare, la ricerca è stata orientata prevalentemente alla definizione di linee guida e buone pratiche per guidare i progettisti negli interventi di riqualificazione degli edifici storici. Sono stati, e ancora si stanno valutando, gli strumenti a disposizione, intesi come materiali e tecnologie innovative che possano migliorare le prestazioni energetiche dei fabbricati, con un livello di integrazione sempre maggiore come si è visto nel capitolo precedente.

Rispetto agli studi che si stanno occupando di definire linee guida di intervento, sono meno numerose, invece, le ricerche che hanno come obiettivo la valutazione degli strumenti e dei metodi usati per ottenere un quadro conoscitivo realistico del comportamento energetico del fabbricato allo stato di fatto.

Di seguito sono presentate le principali ricerche che costituiscono ad oggi lo stato dell'arte nel campo della riqualificazione energetica dell'edilizia storica, divise tra quelle che si occupano di definire linee guida per l'intervento (di seguito presentate) e quelle che, invece, studiano i metodi per la definizione del comportamento energetico allo stato di fatto (*capitolo 5*).

SCHEDA N. 1

Progetto A.T.T.E.S.S. - Elaborazione di linee guida per la riqualificazione energetica del patrimonio storico¹

Un esempio di ricerca volta all'elaborazione di linee guida per la riqualificazione energetica del patrimonio storico è stato recentemente presentato dal Metadistretto Veneto della Bioedilizia in partenariato con il Metadistretto Veneto dei Beni Culturali.

Il progetto si propone di definire con quali modalità sia possibile intervenire sull'edilizia storica secondo criteri di efficienza energetica, di sostenibilità ambientale e di benessere e salubrità *indoor*. L'intento principale di questa ricerca è porre alla base delle scelte di intervento sull'edilizia storica, in termini di prestazioni energetico - ambientali, un approccio metodologico nuovo per coniugare il rispetto conservativo con una visione unitaria e sinergica dell'organismo edilizio storico nei suoi rapporti con l'ambiente circostante, sia quello naturale sia quello antropizzato. Il riesame e la reinterpretazione del costruito storico in funzione delle sue originarie capacità energetico - ambientali consentono, infatti, di restituire agli edifici la qualità che li ha contraddistinti fin dalle origini e di ripensare, in un'ottica di sostenibilità ambientale, le modalità di intervento, per renderle più semplici e meno invasive delle attuali.

Il progetto è terminato con la stesura di linee guida, che individuano una serie di operazioni finalizzate a migliorare le prestazioni energetiche, congiuntamente a quelle ambientali, dell'architettura storica, in coerenza sia con i principi dell'edilizia sostenibile (qualità dei materiali, salubrità degli ambienti, attenzione ad una corretta utilizzazione delle risorse naturali), sia con i criteri della conservazione del patrimonio storico-architettonico (compatibilità materica, minor invasività degli interventi e delle tecnologie applicate).

Alcune strategie proposte sono state testate su un caso studio messo a disposizione dal Comune di Vittorio Veneto: un edificio recentemente ristrutturato situato nel centro storico di Serravalle, su cui sono state svolte analisi e valutazioni del comportamento energetico prima e dopo l'intervento.

Intento del lavoro è stato quello, in primo luogo, di stimolare una riflessione sul tema del mantenimento della memoria storica e della qualità dell'ambiente, consentendo contemporaneamente modalità di intervento utili ad incrementare forme di attività di impresa interne alla logica della *Green Economy*; in secondo luogo, mettere a punto uno strumento informativo e di indirizzo metodologico ed operativo ai professionisti, agli enti, alle aziende ed ai cittadini e capace di dare risposte ai problemi legislativi, metodologici e tecnici dell'intervento sul patrimonio edilizio storico secondo criteri di sostenibilità

¹ Il progetto A.T.T.E.S.S., è stato presentato, a valere sul Bando di assegnazione delle risorse, giunta DGR n. 1965 del 15 luglio 2008, ed è stato ammesso a contributo e finanziato con Decreto del Dirigente regionale della Direzione Sviluppo Economico, Ricerca e Innovazione della Regione del Veneto, giusta DDSE n. 291 del 10 dicembre 2008.

energetico - ambientale ed in funzione dei possibili gradi di vincolo.

L'obiettivo è incrementarne il valore e la funzione per generare una nuova economia di settore che, contrariamente a quanto avviene per le nuove costruzioni, non consuma territorio (*Greenfield*) e riduce l'utilizzo di nuove materie prime.

SCHEDA N. 2

Linee guida sull'uso efficiente dell'energia nel patrimonio storico - Studio promosso dal Ministero dei Beni e delle Attività Culturali²

Il progetto del MiBAC (Ministero per i Beni e le Attività Culturali) muove dalla consapevolezza che la massa delle risorse attivate dalle politiche energetiche è di dimensioni tali da sfruttare una filiera produttiva di notevole valore, con impatti positivi sia sul tessuto economico-produttivo sia sul sistema della tutela del paesaggio e del patrimonio culturale immobile, ambiti di competenza del Ministero. Per evitare che di nuovo le ragioni che spingono allo sviluppo energetico contrastino con la tutela del patrimonio culturale, il MiBAC intende promuovere una riflessione per una possibile integrazione di entrambe le strategie, ugualmente indispensabili. Il contributo del Ministero si basa su tre temi principali:

1. elaborazione di linee guida;
2. definizione di strategie corrette di intervento;
3. buone pratiche per la riqualificazione di edifici storici monumentali, in particolare per quanto riguarda l'uso di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Le linee guida, emanate nel 2010 dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare insieme al Ministero per i Beni e le Attività Culturali, rappresentano un riferimento per la valutazione degli impianti di produzione e dei contesti (linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili). Questa è la ragione, insieme all'esigenza di definire un codice comportamentale per questo tipo di interventi, che ha spinto la promozione di questo studio da parte del MiBAC. Di fianco, quindi, alle indicazioni per il controllo degli interventi sull'edilizia storica, è stata condotta una sperimentazione su edifici monumentali gestiti direttamente dal Ministero. In particolare, è stata evidenziata come strategica la necessità di promuovere iniziative di riqualificazione energetica dei siti museali ed archeologici che, più di altri, rappresentano una spesa di gestione economica ed energetica rilevante. Il fabbisogno di tali edifici

² Lo studio ha coinvolto anche strutture universitarie e docenti tra cui il prof. De Santoli (Direttore centro di Ricerca CITERA, Università di Roma La Sapienza) e il Prof. Carbonara (Presidente del comitato Tecnico-Scientifico per i Beni architettonici e paesaggistici del Ministero).

Si veda: Pasqua Recchia A., *Efficienza energetica e produzione da fonti rinnovabili tra tutela e sviluppo: linee guida per il patrimonio culturale*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Atti del Convegno "La riqualificazione energetica degli edifici storici", Illuminazioni presso GreenBuilding, Verona 4 Maggio 2011, p. 1.

dipende prevalentemente dalla tipologia costruttiva, di destinazione d'uso e di servizi offerti. Queste considerazioni hanno avviato una serie di iniziative istituzionali per la predisposizione di programmi d'azione per il miglioramento dell'efficienza energetica e la riduzione dei consumi e della dipendenza dalle fonti tradizionali di energia nei siti culturali statali. Gli esiti di queste iniziative si sono tradotti nella stipula (Maggio 2010) di un Accordo di Programma con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio e del Mare per la definizione e attuazione di interventi per l'efficientamento e risparmio energetico di strutture museali, siti archeologici e edifici/monumenti e nella predisposizione di un Accordo di Programma (in corso di perfezionamento) con il Ministero dello Sviluppo Economico per interventi legati alla produzione ed uso di fonti rinnovabili.

Lo studio per la definizione di linee guida per gli interventi di riqualificazione energetica sul patrimonio storico statale mira principalmente al raggiungimento di questi obiettivi³:

- minimizzare il tasso di deterioramento dei beni culturali ed individuare un ambiente per la conservazione (*Indoor Environment Engineering*);
- definire specifiche tecniche HVAC (progettazione, installazione, O&M – *Operation and Maintenance*);
- minimizzare il carico ambientale (*Energy Efficiency*);
- rispettare i vincoli architettonici e paesaggistici.

Il progetto è suddivisibile in quattro aree tematiche, che insieme formano le fasi dell'intervento sul patrimonio storico.

La prima operazione riguarda la valutazione degli scopi a partire dalla definizione e individuazione del Patrimonio culturale (*Cultural Heritage*) che si divide in "beni culturali" e "beni paesaggistici" e del concetto di energia, intesa come determinazione degli *standard* in termini di indice di prestazione energetica e di certificazione degli edifici (classificazione energetica o EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*).

Successivamente, è necessario considerare i vincoli imposti sull'edificio dal contesto in cui si inserisce (Ambiente, Paesaggio e Architettura). Una volta conosciuto il contesto di intervento si possono proporre le strategie di riqualificazione calcolando l'indice di prestazione energetica prima e dopo l'intervento e le operazioni che hanno contribuito al miglioramento energetico. Le proposte progettuali vanno poi valutate anche sotto il profilo economico (Analisi Costi/Benefici) e di gestione dell'edificio dopo l'intervento. Un capitolo importante dello studio è quello che riguarda l'integrazione degli impianti da fonte rinnovabile in

³ De Santoli L., *La riqualificazione energetica degli edifici storici*, atti del Convegno «Illuminazioni» presso GreenBuilding, Verona 4 Maggio 2011.

contesti tutelati. L'approccio metodologico proposto ha, quindi, una doppia valenza: nella prima parte serve a indirizzare l'intervento del progettista, nella seconda fornisce gli strumenti di giudizio a chi dovrà valutarlo.

SCHEDA N. 3

Sostenibilità energetica (Energetic sustainability) dei centri storici (Elisa Caivano, Politecnico di Bari)⁴

La ricerca si inserisce nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici storici nella prospettiva di una corretta applicazione dei principi di efficienza energetica, considerando la difficoltà di conciliare i valori di conservazione architettonica, storica, tecnica e funzionale con le sempre crescenti necessità di garantire la riduzione del consumo di energia, parallelamente a una richiesta di prestazioni sempre migliori. È ben noto che i centri storici sono stati costruiti sulla base di un *buonsenso ambientale* che ha guidato le scelte tipologiche del passato; questo *buonsenso ambientale* era così radicato nella mentalità tradizionale che ha permesso lo sviluppo di queste tipologie nei secoli.

Nella ricerca si dà particolare rilievo alla proposizione di criteri, linee guida e strumenti atti a garantire interventi appropriati per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici storici, nell'osservanza dei caratteri costruttivi, strutturali, architettonici e formali tipici dell'edificio. L'obiettivo principale è raggiungibile a partire dalle prestazioni energetiche dei sub-sistemi dell'edificio, anche attraverso la valutazione delle caratteristiche bioclimatiche tipiche degli edifici storici, costruiti senza impianti e per questo progettati con il duplice scopo di difendere dalle condizioni climatiche sfavorevoli e sfruttare quelle favorevoli. La metodologia e le soluzioni analizzate sono state sperimentate su un caso studio, il centro storico di Malfetta, a Terra di Bari, per valutare la compatibilità ambientale delle soluzioni proposte.

Lo studio si articola in diverse fasi:

- conoscenza dello stato di fatto;
- definizione dell'approccio metodologico per la riqualificazione degli edifici del nucleo urbano;
- scelta del caso studio;
- descrizione delle caratteristiche dell'oggetto analizzato;
- definizione del comportamento energetico delle diverse tipologie;
- proposizione di soluzioni tecnologiche atte a incrementare la prestazione energetica.

L'obiettivo della ricerca, pertanto, è la valutazione e la quantificazione, da un punto di vista energetico, degli edifici storici e dei loro singoli componenti: la valutazione dei materiali dell'involucro e dei sistemi

⁴ Caivano E., Fatiguso F., *Energetic sustainability of Historical town centres*, atti del convegno SB10mad, 2010, p. 2.

tecnologici per qualificare le scelte di progetto in funzione dell'efficienza energetica, l'estensione dei risultati alle tipologie più rappresentative in termini di diffusione, a quelle simili per età di costruzione o tecniche costruttive all'interno di una medesima regione e, per finire, la creazione di linee guida, criteri e definizione di sistemi di intervento per la riqualificazione energetica degli edifici storici.

I risultati ottenuti hanno portato alla definizione di procedure specifiche e proposte operative in forma di linee guida, repertorio di buone pratiche e manuale automatizzato per gli interventi su edifici storici e la sperimentazione su di essi di soluzioni tecnologiche e prodotti ad essi compatibili.

Partendo dalla molteplicità degli aspetti che contribuiscono alla definizione delle caratteristiche che contraddistinguono l'area analizzata, l'obiettivo finale è estrapolare, nel contesto, le tipologie maggiormente rappresentative. In particolare, il punto di partenza dell'approccio metodologico presentato, consiste in un'analisi globale del nucleo urbano oggetto di studio, per conoscerne la natura, la morfologia, la tipologia, gli aspetti costruttivi e tecnologici, oltre agli edifici che lo compongono.

Primo aspetto importante per programmare un intervento di riqualificazione è fare un'attenta analisi delle condizioni ambientali e climatiche dell'area, dalle quali è possibile determinare le principali criticità. Qualsiasi intervento, sia ambientale, sia su un edificio, necessita di una conoscenza completa dell'oggetto analizzato, del suo contesto e delle sue relazioni con gli altri elementi che lo circondano. Questo sistema di conoscenza si configura esso stesso come un progetto e pesa fortemente sulle decisioni future di intervento. Pertanto, il metodo deve partire dall'elaborazione di un quadro delle caratteristiche ambientali e geografiche del contesto, definito dagli aspetti fisici, storici, culturali, climatici e sociali che ne costituiscono le invarianti oppure da tutti quegli elementi che hanno rilevanza nella caratterizzazione del territorio analizzato, non perché unici, irripetibili e specifici di quel particolare posto, ma perché di supporto nella propria unicità e irripetibilità per definire il *più* dato dalle leggi non scritte che governano la società. All'analisi delle *invarianti*, fa seguito lo studio degli elementi *variabili* che partecipano alla caratterizzazione dell'identità del luogo: questi hanno a che fare con le tipologie edilizie, le soluzioni tecnologiche e costruttive applicate ad esse in relazione alla posizione planimetrica e altimetrica, alla destinazione d'uso e all'evoluzione storica dell'edificio. Ogni elemento è considerato, dapprima, rispetto alle sue dimensioni generali che lo collocano nel proprio contesto di riferimento, poi attraverso un'analisi più profonda delle caratteristiche specifiche, tipiche del nucleo urbano della tipologia edilizia, della struttura o degli aspetti costruttivi.

Il fatto che le operazioni di *retrofit* degli edifici storici dipendano fortemente da tutte le caratteristiche sopra citate, fa sì che non sia possibile racchiudere l'intervento all'interno di un rigido schema metodologico, ma sia possibile solo creare un *percorso* operativo, articolato in sotto-fasi, l'una a servizio della successiva, a partire dall'inquadramento generale fino alla conoscenza più profonda del fabbricato.

Pertanto, l'intero processo è suddiviso in quattro macro-fasi:

1. fase analitica;
2. fase della valutazione;
3. momento operativo;
4. fase di verifica.

Ogni *step* è suddiviso in altri livelli di investigazione. Per ciascuno di questi livelli, poi, è prevista un'articolazione a molti altri sub-livelli, non necessariamente connessi da relazioni consequenziali.

Il punto di partenza di qualsiasi attività che abbia come oggetto un edificio esistente è rappresentata dalla costruzione di un *quadro conoscitivo* del manufatto. Una profonda conoscenza dell'architettura tradizionale, non solo per quanto riguarda l'assetto, la tipologia edilizia, o gli aspetti distributivi, ma anche in riferimento a materiali e tecnologia costruttiva, deve essere considerata una condizione necessaria per la sua conservazione e tutela. Il *progetto di conoscenza* è il fondamento stesso di un nuovo approccio per la progettazione di un intervento di riqualificazione su un edificio esistente. Questo processo conoscitivo si articola in diverse fasi, contraddistinte da un diverso livello di approfondimento.

La contestualizzazione (livello I) serve a definire i limiti di riferimento di questo quadro (localizzazione geografica dell'edificio, definizione del campo d'azione, destinazione d'uso) che saranno a capo delle scelte derivate dall'analisi e dal progetto; in questa fase, il panorama legislativo e normativo fungerà da *background* dell'intero processo. Soltanto una volta che si è definita l'area di intervento e il contesto operativo è possibile procedere con la configurazione di una serie diversificata di valutazioni per completare quanto più possibile il quadro conoscitivo necessario.

L'analisi a scala territoriale (livello II) è orientata alla conoscenza più approfondita degli aspetti biofisici e climatici del posto, non solo in termini di temperature medie e massime, ma anche in termini di umidità, condizione del vento, delle precipitazioni e come questi aspetti interagiscono con l'edificio.

Successivamente c'è il livello III, contraddistinto dall'analisi alla scala urbana che, articolato nell'analisi storica dell'ambiente costruito e nell'analisi delle tipologie e delle caratteristiche costruttive, porta a scoprire le origini del nucleo storico oggetto di studio, alla luce delle considerazioni fatte sull'intero ambiente costruito.

Ad una scala più dettagliata (livello IV) è necessario capire quali siano le tipologie edilizie e in particolare il loro rapporto con l'ambiente e gli aspetti climatici in cui sono costruite. Attraverso questa analisi e l'estrapolazione degli aspetti invarianti e variabili e delle criticità energetiche, è possibile definire le soluzioni tecnologiche più idonee che testate su un particolare caso studio, possano poi essere estese ad una molteplicità di altri casi.

SCHEDA N. 4

Workshop interuniversitario

La Facoltà di Architettura dell'Università di Chieti-Pescara⁵ ha organizzato, nel Giugno 2010 il workshop progettuale interuniversitario *Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano*.

“L'evento è stato l'occasione per dare nuovi impulsi al dibattito sul ruolo e il contributo della formazione tecnologica in rapporto alle istanze fissate dalla ricerca sui temi della sostenibilità per la sperimentazione di strategie progettuali rivolte alla fragilità dei territori colpiti dal sisma aquilano⁶.

L'obiettivo del progetto è definire strategie di intervento per valorizzare i territori colpiti dal disastro naturale, ma che da lungo tempo soffrono fenomeni di abbandono e decentralizzazione dei servizi per una sempre più forte inadeguatezza delle caratteristiche edilizie ed energetiche offerte. Intervenire dove il sisma ha distrutto, tutto o parte del territorio, significa cogliere l'occasione per stimolare nel territorio un processo di rivitalizzazione, valorizzazione e parziale rifunzionalizzazione dei suoi centri abitati minori.

In questa logica può giocare un ruolo importante l'azione di riqualificazione energetico - ambientale, intesa non solo come componente del recupero tecnologico e funzionale degli edifici, ma anche come motore dello sviluppo economico e sociale del comprensorio geografico: un luogo caratterizzato da piccole realtà abitative dall'elevato valore storico morfologico, fortemente connotate dalla presenza di residenza non stanziale, oggi pressoché abbandonate a causa dei danni causati dal terremoto.

Tra i diversi ambiti di indagine si cita la *riqualificazione* interpretata come “sfida volta ad individuare nuova qualità per il patrimonio costruito esistente e a garantirne il livello attraverso le proposte di una metodologia di analisi dell'esistente e di parametri di valutazione delle prestazioni introdotte; con ciò si dovrebbe cogliere l'opportunità di riqualificare gli edifici a livello energetico - ambientale, oltre che strutturale⁷”. I progetti presentati in questo ambito di lavoro, quindi, si sono occupati di descrivere le strategie possibili di intervento energetico in piccoli borghi antichi di indubbio valore storico, che possano rivitalizzare l'economia locale attraverso nuovi canali turistici (rifunzionalizzazione di alcuni edifici) e richiamare la popolazione attraverso un' offerta abitativa a più elevate prestazioni.

⁵ Coordinamento: professori M.C. Forlani e G. Eusani dell'Università degli studi “G. D'Annunzio” di Chieti Pescara; comitato scientifico: forum formazione SiTda. Il Workshop progettuale si è svolto tra Pescara e Caporciano dal 31 Maggio al 5 Giugno 2010. L'attività è stata promossa da SiTda (Società Italiana Tecnologia dell'Architettura) e dal Dipartimento di tecnologie per l'ambiente costruito dell'Università di Chieti Pescara.

⁶ Felli P., *Presentazione in Cultura tecnologica e progetto sostenibile*, atti del workshop SiTda «Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano» a cura di M.C. Forlani, Alinea Editrice, Perugia, 2010, p. 5.

⁷ Forlani M.C., *Alcuni elementi di riflessione come premessa al workshop*, in Forlani M.C., a cura di, *Cultura tecnologica e progetto sostenibile*, op. cit., p. 16.

Di seguito è presentato un breve resoconto di alcuni contributi presentati in occasione del Workshop.

Retrofit energetico ed edificato storico (Università di Pescara)⁸

A) Riqualificazione energetica del borgo storico di Castelvecchio Calvisio (Aquila)

Il borgo di Castelvecchio Calvisio è stato scelto come oggetto di studio perché rappresenta un modello emblematico di centro abitato antico e può dare risultati utili da estendere al caso generale. L'aggregato è, infatti, caratterizzato da due tipologie edilizie omogenee (casa a schiera e casa a palazzo) e da una uniformità di materiali utilizzati (pietra e legno). Le verifiche fatte sugli edifici per il calcolo del fabbisogno energetico sono state condotte utilizzando un *software* di simulazione dinamica (*energyplus*) per considerare, nel calcolo, i fenomeni transitori dati dall'elevata inerzia termica delle strutture. Considerare le caratteristiche tipiche del fabbricato storico è stato fondamentale per non commettere un errore importante nella determinazione successiva degli interventi di *retrofit*. Infatti, calcolando l'indice di prestazione energetica EP_{gi} usando il procedimento di verifica consigliato dalla normativa vigente (che considera solo la trasmittanza termica dell'involucro) il risultato sarebbe stato molto peggiore di quello ottenuto con la simulazione in regime dinamico⁹. Il primo valore, infatti, risulta molto maggiore dell'indice di prestazione energetica minimo imposto dalla normativa, mentre il secondo solo di poco. Questo significa che l'intervento di miglioramento prestazionale può essere molto ridotto rispetto a quanto appaia nel primo caso. Invece di prevedere un nuovo isolamento dell'involucro (per migliorare la trasmittanza delle pareti che risulta insoddisfacente dai calcoli) e quindi rischiare inutilmente problemi di condensa oltre al cambiamento dell'aspetto architettonico del fabbricato, è possibile intervenire soltanto in copertura. La soluzione proposta permette di abbassare l'indice di prestazione energetica sotto il limite consentito.

L'edificio allo stato di fatto presenta un valore di EP_{gi} di 115 kWh/m²a (limite per la zona climatica F= 98 kWh/m²a (mentre il dato ottenuto in regime stazionario è 212 kWh/m²a) può raggiungere i 71 kWh/m²a soltanto realizzando una nuova copertura isolata e ventilata. Una simulazione più corretta e simile al dato reale ha permesso di valutare in maniera più appropriata gli interventi evitando soluzioni che avrebbero rischiato di peggiorare la prestazione dell'edificio invece di migliorarla.

B) Riqualificazione energetica della sede comunale di Caporciano (Aquila)

⁸ Si veda: Chella F., *Retrofit energetico ed edificato storico*, in Forlani M.C., a cura di, *Cultura tecnologica e progetto sostenibile*, op. cit., pagina 16, p. 180.

⁹ La ricerca dimostrerà questo aspetto simulando i casi studio attraverso i due sistemi di verifica. Si rimanda al *Capitolo 7.6* per la trattazione completa dell'argomento.

Il caso studio è un edificio singolo e isolato con le caratteristiche tipiche del fabbricato risalente al dopoguerra: struttura in muratura portante con mattoni pieni e finitura ad intonaco, copertura in legno senza isolante termico e altezze interne elevate (3,4 m). La diagnosi energetica, fatta in base alle condizioni climatiche e geografiche dell'area, oltre alla configurazione tecnologica e morfologica del fabbricato, ha evidenziato una carenza nella prestazione energetica dell'involucro. Pertanto è stata seguita una duplice strategia di intervento. La prima, che si basa sul miglioramento delle singole parti analizzate nella fase diagnostica (miglioramento dell'isolamento termico e sostituzione degli infissi) è l'intervento convenzionale. Mentre la seconda rappresenta la soluzione più innovativa. Si tratta di integrare sistemi energetici passivi che possano contribuire in maniera sostanziale al miglioramento dell'efficienza globale dell'edificio e del *comfort* interno. Attraverso il solo intervento *convenzionale* non è possibile avvicinarsi alle prestazioni energetiche richieste dalla normativa, pertanto è stato necessario riconsiderare anche la componente impiantistica. I sistemi passivi ipotizzati sono serre solari (addossate alla facciata sud), schermature e coperture verdi, camini di ventilazione interrati e sistemi per il controllo e la gestione dell'illuminazione naturale. Per ottimizzare il comportamento del sistema edificio – impianto è stato previsto un impianto radiante a soffitto, sia per la climatizzazione invernale sia per quella estiva, alimentato da un sistema solare posto in copertura. L'intervento *non convenzionale* ha permesso di raggiungere risultati sensibilmente migliori rispetto al solo efficientamento dell'involucro.

BORGO_CLIMA

Un processo di riqualificazione energetico - ambientale del tessuto storico

(Facoltà di Architettura di Ferrara e IUAV di Venezia)

Il contributo di oggetto è presentato in maniera più estesa rispetto a quello delle altre facoltà perché l'esperienza portata a termine durante il *workshop* si è inserita a tutti gli effetti tra le attività della ricerca di Dottorato qui presentata. Il tema della riqualificazione energetica del patrimonio storico viene affrontato dal Centro Architettura>Energia¹⁰ con due obiettivi prioritari: il primo, è fornire una risposta immediata alla necessità di valutazione energetica del patrimonio storico proponendo un adattamento dell'attuale corpo normativo e delle metodologie di calcolo alla specifica categoria edilizia indagata (attività presentata al *workshop*); il secondo obiettivo, parallelo, e specifico di questo lavoro di ricerca, è quello di rivedere il metodo di calcolo alla base della valutazione per proporre alcuni affinamenti alle parti ritenute non adeguate all'applicazione su contesti edilizi antichi.

¹⁰ Il Centro di ricerca Architettura>Energia è il centro in cui opera la Dottoranda Marta Calzolari e all'interno del cui alveo è stata condotta la ricerca di dottorato presentata in questa tesi. www.unife.it/centri/centro/architetturaenergia.it.

Un primo momento di verifica e conferma della parte iniziale della ricerca si è avuto proprio durante il *workshop* progettuale “Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano” al quale le Facoltà di Architettura dell' Università di Ferrara ha preso parte attivamente dando qualche primo interessante risultato anche per il seguito della ricerca.

L'innalzamento delle prestazioni energetiche del patrimonio edilizio storico implica riflessioni riguardo al valore testimoniale e monumentale di alcuni manufatti architettonici o di interi borghi; in molti casi è opportuno evitare gli interventi che, pur migliorando le prestazioni energetiche, apporterebbero inevitabili modifiche all'edificato, snaturandone il significato e il valore storico-culturale.

È il caso di Caporciano, paese di quasi trecento abitazioni poste su un colle dell'Altopiano di Navelli, identificato come caso studio su cui testare strategie anticrisi innovative ed attente alla memoria e alle matrici storiche del borgo, contribuendo a promuovere l'attività sociale ed economica e di raggiungere l'obiettivo del “Borgo Clima”.

La ricostruzione, dopo eventi catastrofici come un terremoto, è una necessità pressante per rispondere al bisogno di alloggio che la popolazione richiede all'improvviso. La contingenza della domanda deve essere controllata, senza avvalersi spesso di idonei e calibrati strumenti di pianificazione redatti per l'occasione. Una situazione critica come quella che si presenta davanti ai disastri naturali deve diventare un'opportunità per integrare le operazioni di recupero e messa in sicurezza del costruito con strategie per il miglioramento della qualità ambientale dei tessuti edilizi. Nel caso specifico della Regione Abruzzo e delle località colpite dal terremoto (in particolare negli aggregati urbani dell'altopiano di Navelli) l'occasione è duplice: da un lato vi è la possibilità di recuperare gli edifici da tempo abbandonati per il graduale spopolamento dei borghi, dall'altro è possibile creare la condizione per valorizzare i manufatti storici con differenti livelli di tutela, ma accumulati da un elevato valore documentale.

Le strategie di recupero energetico degli edifici storici dipendono fortemente dal livello di tutela imposto al fabbricato e dal suo stato di conservazione; il primo livello di intervento è la conservazione totale dell'edificio, attraverso l'identificazione delle caratteristiche testimoniali ed estetiche che lo contraddistinguono e che vanno preservate a prescindere dagli interventi di riqualificazione. Il secondo livello, il restauro energetico, mira a recuperare e valorizzare le capacità di auto controllo energetico e ambientale intrinseche a ciascun edificio storico. È importante che tali caratteristiche siano identificate e che da queste si sviluppino le successive operazioni di riqualificazione energetica: il nuovo assetto dell'edificio e il progetto di *energy retrofit* non devono inficiare la loro efficacia, ma esaltarla. L'ultimo livello è l'intervento di riqualificazione energetica vero e proprio, che prevede l'integrazione di nuove soluzioni per l'involucro e per gli impianti. Questa fase permette di raggiungere prestazioni energetiche elevate per

ogni singolo edificio, in grado di soddisfare i più recenti requisiti normativi, e di pianificare operazioni di *retrofit* i cui risultati abbiano ricadute significative anche alla scala urbana.

Il progetto presentato, denominato *Borgo Clima*, prevede la definizione di strategie per l'innalzamento delle prestazioni energetiche dell'intero aggregato urbano di Caporciano, secondo il criterio compensativo fra i diversi edifici esposto precedentemente.

Considerato il fattore che influisce maggiormente sulla qualità ambientale del paese, il comportamento energetico del suo edificato, gli obiettivi dello studio prevedono di valutare la prestazione energetica residua dell'intero borgo, per definirne il quadro dello stato di fatto; successivamente, si prosegue con l'individuazione dei possibili scenari di intervento in relazione alle strategie di rifunzionalizzazione dell'insediamento, definite in base alla vocazione di ciascun fabbricato ad accogliere nuove funzioni.

In seguito alla definizione di un piano di riutilizzo del centro abitato, è necessario determinare i materiali e le tecnologie più idonee per l'innalzamento prestazionale in riferimento al contesto, da un punto di vista geografico e culturale. La scelta delle tecnologie costruttive può creare interessanti condizioni per il nuovo sviluppo economico dell'area.

Le strategie di carattere generale individuate in questa fase sono state sistematizzate in un modello applicabile al progetto pilota individuato (Comune di Caporciano). Per raggiungere tali obiettivi si è realizzata un'indagine speditiva del patrimonio edilizio del borgo, attraverso un rilievo tecnologico ed energetico delle principali caratteristiche costruttive utilizzate e dei livelli prestazionali residui degli edifici.

I risultati del sopralluogo sono stati raccolti e sistematizzati attraverso schede di valutazione dell'intero patrimonio edilizio per realizzare un database relazionale di analisi dello scenario attuale.

Le linee di intervento per la riqualificazione del borgo, poi proposte, permettono di pianificare le operazioni attraverso successive fasi di attuazione. E' possibile individuare gli scenari di riqualificazione in relazione al quadro di previsione economica definitivo in fase di pianificazione e rispetto ai finanziamenti ottenuti. Una programmazione temporale della riqualificazione permette di operare su singole porzioni degli aggregati, senza vanificare il risultato finale delle strategie di recupero.

La formazione in pochi giorni del database tipologico/tecnologico dell'edilizia esistente di Caporciano è stata possibile grazie all'elaborazione di un protocollo di rilievo speditivo capace di semplificare le operazioni di acquisizione dell'elevata mole di dati.

La predisposizione di questo sistema informatizzato permette di ottenere uno strumento semplice e, grazie ad un'interfaccia *user-friendly*, utilizzabile direttamente in sito grazie ad un palmare, in grado di restituire, rilievo dopo rilievo, il progressivo stato di fatto delle caratteristiche tecnologiche ed energetiche del borgo. Il modello informatico ha permesso, incrociando dati caratteristici dei diversi edifici rilevati, di identificare criticità e prestazioni energetiche di ogni singola unità e, automaticamente, dell'intero edificato.

Caporciano, che conta 286 edifici, è per la quasi totalità un borgo residenziale, dove il 37% delle abitazioni è occupato da stanziali, mentre il restante 63% è costituito da seconde case o edifici disabitati a causa dei danni provocati dal sisma. I servizi scolastici e ospedalieri hanno sede nei paesi vicini dell'altopiano di Navelli, mentre quelli di immediata necessità sono situati in poche unità edilizie.

Il modello di *audit* energetico speditivo è nato dall'esigenza di rilevare il maggior numero di edifici possibili nel ridotto tempo disponibile del *workshop* ed è apparso una soluzione adeguata, considerata la peculiarità principale del paese: l'architettura contraddistinta da grande omogeneità tipologica, di destinazione d'uso e spesso anche geometrico-dimensionale del costruito. Tale caratteristica ha consentito di concentrare le informazioni da rilevare in pochi mirati punti distintivi della trama residenziale storicizzata. La scheda di rilievo semplificato ha permesso di documentare le caratteristiche tipologiche, dimensionali e tecnologiche di ogni unità, in modo da poterne dedurre l'EP_{gl} (indice di prestazione energetica globale). Inoltre è stato rilevato lo stato di degrado dovuto all'azione del sisma in modo da pianificare gli interventi di riqualificazione tecnologico/energetica in funzione dei danni riportati.

La campagna di rilievo ha previsto di rilevare, facilmente e in tempi brevi, larga parte degli edifici e di schedarli per ipotizzarne i potenziali interventi conservativi per il mantenimento delle caratteristiche testimoniali ed estetiche, gli interventi di restauro energetico/ambientale e quelli di *energy retrofit*.

Il *format* compilato ha individuato per ogni edificio rilevato l'epoca di costruzione (73,6% degli edifici precedenti al 1949, 21,7% tra gli anni '50 e gli anni '90, 4,7% successivi al 1991, termine adottato in riferimento agli adeguamenti previsti dalla Legge 10 entrata in vigore da quell'anno). È stato, poi, possibile identificare la destinazione d'uso prevalente nel borgo, che risulta per l'84% residenziale, il 3,8% commerciale, il 2,8% direzionale e mista per il restante 9,4%. Il modello ha previsto, inoltre, l'indicazione del grado di tutela dell'edificio e della presenza di modanature, cornici a porte e finestre o altri elementi di valore storico da conservare nel caso di riqualificazione ambientale e morfologica dell'involucro. In questo caso oltre il 60% delle costruzioni presenta elementi significativi di cui tener conto nelle strategie d'intervento. L'attività di analisi sul campo ha inoltre messo in evidenza alcune caratteristiche architettonico/tipologiche dall'importante valore testimoniale: i *buffer* superiori o inferiori, presenti rispettivamente per il 12,3% e il 18,9% degli edifici (interi piani sottotetto o cantine non riscaldati, fienili addossati o sovrapposti all'unità abitativa, alcune grotte, caratteristiche della zona geografica, utilizzate come scantinati).

Questi vani svolgono funzioni ambientali, quali la ventilazione, l'accumulo di calore o il controllo termigrometrico degli spazi contigui; funzioni che incrementano il contenimento energetico dell'edificio e sono pertanto elementi da valutare attentamente per un loro potenziale riutilizzo in caso di riqualificazione energetico - ambientale.

È stato fondamentale anche analizzare quale quadro impiantistico fosse presente negli edifici. La quasi totalità del borgo è servita dalla rete di gas metano che alimenta caldaie e boiler per il riscaldamento e la produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari indipendenti per ogni alloggio. In pochi casi, tutti concentrati nelle aree perimetrali (zone di espansione urbana), alcune nuove unità sono dotate di caldaie alimentate a biomasse.

Per quanto riguarda la possibilità di riqualificazione energetico/ambientale di ogni edificio è stato rilevato lo stato dell'involucro in modo da evidenziare quali fossero le tecnologie prevalentemente usate per la sua costruzione. Le tecnologie riscontrate nell'abitato sono: muratura in pietra di spessore inferiore a 70 cm (quota maggiore degli edifici, pari al 77,4% dei casi), superiore a 70 cm, struttura mista a telaio in calcestruzzo con tamponamenti in blocchi cavi, copertura e solaio a terra coibentati o meno. Questa valutazione è stata essenziale per definire le caratteristiche attuali del patrimonio edilizio del borgo. Non avendo dati sufficienti per elaborare un calcolo standardizzato (UNI TS 11300, parti 1 e 2) dell'EP_{gl}, per il quale sarebbero stati necessari approfonditi rilievi di ogni edificio, si è optato per il metodo di diagnosi energetica per analogia con casi simili (in maniera conforme a quanto introdotto dai D.lgs. n. 192/2005 e D.lgs. n. 311/2006, con il Metodo di calcolo da Rilievo su Edificio Esistente).

Questo procedimento ha quindi richiesto l'acquisizione di alcuni dati di *benchmark* da cui dedurre, per trasposizione sull'intero campione rilevato, la prestazione energetica globale di Caporciano. Tali dati sono stati valutati servendosi di un caso studio, rappresentativo del tipo edilizio del borgo per funzione, morfologia e dimensioni. La diagnosi energetica è stata condotta simulando l'edificio con le tecnologie tipiche (in riferimento a chiusura verticale esterna e chiusure orizzontali superiore e inferiore) rilevate durante la campagna.

Il calcolo, condotto mediante l'utilizzo del software *Energy Plus*, con interfaccia *Design Builder*, ha permesso di ottenere livelli di consumo energetico da parametrizzare sul totale di edifici componenti il paese, in maniera da determinarne i valori prestazionali globali. Il *software* impiegato permette di eseguire il calcolo in regime dinamico delle prestazioni energetiche e di valutare quindi in maniera più precisa il comportamento energetico del caso studio. Il programma consente, infatti, la valutazione delle reali variazioni climatiche; in questo modo anche il calcolo degli scambi termici con l'esterno è condotto in maniera più accurata, avvicinandosi alla simulazione dello scenario reale.

In conclusione, la metodologia adottata ha permesso di rilevare il 37% del patrimonio edilizio esistente, pari a 106 unità abitative, quota ritenuta sufficiente a descrivere la totalità dei tipi edilizi del borgo. Il campione analizzato ha consentito la successiva parametrizzazione sul resto dell'edificato e ha fornito i valori relativi ai consumi energetici di Caporciano, stimati intorno a 4,5 milioni di kWh annui, riferiti alla percentuale di edifici effettivamente occupati (37%), e addirittura oltre i 12 milioni di kWh annui, se si

.....

ipotizza l'intero borgo funzionante. La diagnosi ha indicato un indice di prestazione energetica medio EP_{gi} medio = 337 kWh/m² annuo, corrispondente alla Classe G definita dalle Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica degli Edifici.

Inoltre, l'ingente quantità di dati acquisiti con il rilievo è servita a creare un repertorio delle tecnologie più comuni nel Borgo. La maggior parte degli edifici è costituita da strutture portanti in pietra di 60-100 cm di spessore, con coperture lignee e manto di copertura in coppi di laterizio. La percentuale di edifici successivi agli anni Cinquanta è molto inferiore rispetto a quella di edifici storici. I fabbricati più recenti sono caratterizzati da chiusure verticali in blocchi cavi di laterizio da 20 cm intonacati e, per quelli successivi al 1991, dotati di un minimo strato isolante (3 cm di EPS). Per ciascuna tecnologia costruttiva sono stati valutati i valori di trasmittanza termica.

Il repertorio delle principali soluzioni tecnologiche ha permesso, poi, di valutare correttamente le tipologie di materiali isolanti più idonee per innalzare le prestazioni degli edifici. Le soluzioni sono state valutate in base a parametri che dipendono dal luogo di posa (interno o esterno), dal tipo di elemento tecnologico da isolare (chiusure verticali o orizzontali/inclinate) e dalle caratteristiche specifiche dei singoli materiali isolanti. In particolare, l'adeguamento prestazionale e l'adattamento dei materiali alla fabbrica storica ha avuto un significativo peso nella scelta della soluzione ipotizzata per la riqualificazione degli edifici. In base a questi criteri si è optato per la fibra di legno, un isolante naturale, particolarmente compatibile con i materiali tradizionali degli edifici storici, che consente di realizzare cappotti interni riducendo il problema della formazione di condensa. L'uso della fibra di legno persegue l'obiettivo di riqualificare energeticamente l'aggregato urbano, fornendo tuttavia al contempo qualche opportunità di sviluppo del tessuto produttivo locale messo in ginocchio dagli eventi sismici: attraverso la produzione a "chilometri zero" di questo materiale per favorire la riconversione di una parte della filiera artigianale e la disseminazione del *know-how* per superare l'emergenza e alimentare lo sviluppo economico anche in seguito. In questo modo si potrebbero sistematizzare pratiche produttive legate alla *Green Economy* e fare della ricostruzione l'occasione per la costruzione del futuro. Altri isolanti innovativi, di tipo sintetico, hanno permesso di ottenere valori di trasmittanza molto inferiori, rispetto ai materiali tradizionali, con spessori decisamente ridotti.

Attraverso la simulazione degli interventi di *energy retrofit*, è stata eseguita una valutazione comparativa sul miglioramento prestazionale prodotto dall'applicazione, ai diversi tipi di involucro, delle strategie d'intervento, quali: isolamento a cappotto esterno (fibra di legno di 20 cm o termo-intonaco di 4 cm) e isolamento interno (fibra di legno di 8 cm o multistrato riflettente). Lo stesso è stato verificato per le chiusure superiore ed inferiore, ipotizzate non coibentate nello stato attuale, sulle quali si è intervenuto attraverso l'applicazione di isolamento termico: fibra di legno di 10 cm o isolante multistrato riflettente per

la copertura, 30 cm di vetro cellulare in granuli per il solaio a terra. Inoltre si è valutata la sostituzione dei serramenti originali in vetro singolo con nuovi a vetrocamera basso-emissiva.

Gli interventi di *energy retrofit* condotti sul caso studio, derivanti dalle precedenti analisi alla scala del borgo, hanno consentito di parametrizzare i benefici energetici conseguibili grazie all'impiego di determinate tecnologie dell'involucro e dell'impianto.

Utilizzando il *software* sono stati simulati, sul caso studio, i possibili interventi di riqualificazione energetica. Come descritto in precedenza, il rilievo dello stato di fatto ha messo in luce le differenze tra gli edifici di Caporciano, grazie all'identificazione di imprescindibili peculiarità architettoniche che hanno imposto attente valutazioni sugli interventi di recupero. A titolo esemplificativo, la presenza di una finitura superficiale faccia vista ha precluso l'adozione di sistemi a cappotto esterno di elevato spessore, mentre l'esistenza di modanature o cornici a porte e finestre ha ristretto tale possibilità all'impiego di un ridotto strato di termointonaco (in maniera da isolare parzialmente, senza tuttavia compromettere la possibilità di lettura dei rilievi dal valore estetico e storico). Nella stessa maniera sono state fatte valutazioni in riferimento al sistema impiantistico, ipotizzando la sostituzione delle vecchie caldaie a metano con sistemi a pavimento radiante alimentati da pompa di calore elettrica, nel caso in cui l'edificio dovesse sostenere incisive opere edilizie a causa degli elevati danni del terremoto (smantellamento dei solai per l'allocatione del sistema radiante), o con nuovi generatori a condensazione negli altri casi.

Definite le percentuali di miglioramento prestazionale per ciascuno di questi interventi, analogamente a quanto svolto sullo stato di fatto per la definizione della prestazione energetica del borgo, è stato possibile elaborare un nuovo bilancio energetico globale, applicando i predetti scenari di *energy retrofit* agli edifici di Caporciano.

Immaginando una crescita degli abitanti tale da occupare il 60% degli edifici, dovuta alla rivitalizzazione economica e sociale indotta dalla piccola industria energetica (filiera locale di produzione di materiali da costruzione, crescita dei posti di lavoro nel campo dell'edilizia, ecc., su base previsionale fornite dall'amministrazione comunale stessa), la prestazione energetica del borgo risulterebbe pari a circa 2 milioni di kWh annui. Se invece si analizza il borgo completamente occupato (nell'ipotesi, ad esempio, del periodo dell'anno in cui le seconde-case sono occupate dai proprietari) la domanda energetica del borgo è pari a circa 3,3 milioni di kWh annui, un dato ancora inferiore a quello relativo alla sola quota degli edifici attualmente occupati (4,5 milioni di kWh annui).

Il nuovo EP_{gi} medio è di 82 kWh/m² annuo, corrispondente alla Classe energetica C.

Grazie al rilievo architettonico, tecnologico ed energetico dell'intero paese, sono stati identificati cinque edifici il cui degrado imponeva consistenti operazioni di consolidamento, o addirittura demolizione e ricostruzione. Essi, rinominati *Energy Spot*, sono stati oggetto di una sperimentazione innovativa per

convertirli in centrali di cogenerazione di quartiere; al loro interno potrebbe essere posizionata una microturbina capace di generare energia termica ed elettrica grazie alla combustione di biomasse legnose (provenienti dalle potature delle aree verdi e dalle zone agricole circostanti).

Questa strategia di riqualificazione energetica a livello urbano permette all'intero borgo di abbassare ulteriormente il livello dei consumi, raggiungendo prestazioni energetiche migliori e rafforzando, dunque, i principi di un vero e proprio *Borgo Clima*¹¹.

Il Centro Architettura>Energia sta portando avanti questa ricerca, attraverso l'applicazione del suddetto metodo di indagine e programmazione dell'intervento di riqualificazione energetica su un altro caso studio, il Comune di Apice Vecchia (BN). Lo studio progettuale è descritto nella scheda seguente.

SCHEDA N. 5

Ricerche Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara

Studio integrato per il Borgo storico di Apice Vecchia. Strategie progettuali per l'efficientamento energetico e l'integrazione di sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili

(Centro Ricerche Architettura>Energia in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra – Università degli studi di Ferrara)¹²

Il Comune di Apice Vecchia, situato a pochi chilometri da Benevento, è oggi completamente disabitato a causa dei consistenti danni strutturali causati dai forti eventi sismici che nel 1962 e nel 1980 colpirono la zona generando un elevato livello di criticità per la sicurezza dei cittadini. I danni furono così elevati, che l'Amministrazione decise di spostare la comunità, fondando un nuovo paese (Apice Nuova) a pochi chilometri, sulla sommità del colle prospiciente.

Lo studio integrato è stato svolto a supporto tecnico del redigendo studio di fattibilità a cura di due distinti gruppi di ricerca. L'UNITÀ 1, del Centro Ricerche Architettura>Energia del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara, ha raggiunto i seguenti risultati:

- valutazione preliminare dello stato di fatto tecnologico ed energetico del complesso di edifici del

¹¹ Belpoliti V., Calzolari M., Reitano R., *La Riqualificazione del costruito - Un processo di riqualificazione storico ambientale del tessuto storico: la proposta di "Borgo-Clima"* in M.C. Forlani, a cura di, *Cultura tecnologica e progetto sostenibile, op. cit.*, p. 308.

¹² Gruppo di lavoro:

Unità 1 - Dipartimento di Architettura : P. Davoli, A. Rinaldi, G. Bizzarri, L. Gabrielli, V. Belpoliti, P. Boarin, M. Calzolari, V. Farinelli
Unità 2 - Dipartimento di Geologia: R. Caputo, N. Abu-Zeid, S. Bignardi.

borgo, funzionale alla definizione delle prestazioni attuali dell'insieme di fabbricati e finalizzata all'individuazione di problematiche e potenzialità del processo di riqualificazione;

- analisi preliminare sulle potenzialità di sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili all'interno del territorio di Apice Vecchia, in relazione ai fattori ambientali e tecnologici del territorio;
- definizione di scenari di intervento riguardanti la riqualificazione energetica e ambientale del borgo storico di Apice Vecchia, al fine del raggiungimento degli obiettivi di innalzamento prestazionale attraverso strategie pertinenti allo stato di fatto costruttivo, al contesto di riferimento e alle funzioni previste dallo studio di fattibilità;
- definizione di scenari di integrazione delle fonti energetiche rinnovabili al fine di raggiungere gli obiettivi di produzione di energia attraverso strategie pertinenti alla valorizzazione delle risorse presenti sul territorio, alla verifica della compatibilità architettonica e paesaggistica e all'utilità per le funzioni previste dallo studio di fattibilità.

L'UNITÀ 2, a cura del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Ferrara, ha raggiunto i seguenti risultati:

- indagini preliminari relative al sito ed ai suoi immediati dintorni mediante analisi degli aspetti geologici, litologici, stratigrafici, strutturali, morfologici e sismotettonici come desunti da osservazioni dirette di terreno e dalla letteratura disponibile;
- indagini geofisiche lungo transetti e siti selezionati all'interno del borgo storico basate su tomografie di resistività elettrica, profili mediante *ground penetrating radar* e analisi sismiche con la tecnica dei microtremiti.

In particolare saranno descritte le fasi del lavoro dell'Unità 1, perché direttamente connesse ai temi della tesi di ricerca presentata e perché facenti parte a pieno titolo dell'attività di ricerca del Dottorato.

La prima fase del lavoro, che ha fatto seguito all'indagine documentale del materiale disponibile sull'oggetto di studio,¹³ è consistita in un sopralluogo per il rilievo dei dati sul campo. Ai fini della definizione del quadro conoscitivo attuale del nucleo abitato, si è ritenuto opportuno procedere attraverso l'indagine diretta dei fabbricati esistenti tramite un protocollo di rilievo di tipo speditivo necessario all'acquisizione in loco delle caratteristiche tecnologiche dei fabbricati, utili alla determinazione del quadro di prestazioni residue dal punto di vista energetico e ambientale. Il rilievo sul campo è stato eseguito dal

¹³ Elaborati prodotti per il Comune di Apice dall'Università IUAV di Venezia: *Studio di fattibilità tecnico-scientifica per l'individuazione di un programma di interventi di restauro conservativo e funzionale per la città di Apice*, 2004, paragrafo 7.1. Elenco dei riferimenti e delle risorse utilizzati. In particolare: Università IUAV di Venezia, *Studio di fattibilità tecnico-scientifica per l'individuazione di un programma di interventi di restauro conservativo e funzionale per la città di Apice*, 2004.

gruppo di lavoro nelle giornate del 6, 7 e 8 giugno 2012. La metodologia di indagine, elaborata dal Centro Ricerche Architettura>Energia e adottata negli studi inerenti la valutazione delle prestazioni dei borghi storici¹⁴, si è avvalsa inoltre di una scheda di rilievo semplificato che ha consentito di documentare le caratteristiche tipologiche, dimensionali e tecnologiche di ogni unità. Per ogni edificio il *format* compilato ha documentato:

- il numero di piani abitabili;
- la presenza di elementi di valore storico-artistico sul paramento murario;
- la tipologia di edificio (a schiera o di testata);
- il tipo di sistema strutturale (muratura portante o pilastri);
- la colorazione del paramento murario (chiara, media o scura);
- la presenza di spazi di mitigazione bioclimatica (buffer inferiori o superiori);
- la presenza di ponti termici (volti esterni, androni, balconi o logge);
- le tecnologie delle chiusure verticali opache, evidenziando la presenza di intonaci esterni;
- le tecnologie delle chiusure superiori, evidenziando la presenza di controsoffitti;
- il tipo di chiusura superiore (a falda o piana);
- la presenza di danni causati dagli eventi sismici (bassi come modeste lesioni o fessurazioni, medi come piccoli crolli oppure alti come crolli di solai o di coperture);
- ulteriori elementi di rilievo ai fini della valutazione energetico-ambientale quali eventuali piani rialzati, la presenza di elementi di disomogeneità materica degli apparati murari (ad esempio la presenza di buche pontate).

L'indagine speditiva ha permesso di raccogliere una rilevante quantità di informazioni inerenti l'architettura tradizionale di Apice Vecchia, utili per la creazione di un repertorio delle tecnologie costruttive e dei materiali più diffusi all'interno del borgo. Ciascuna chiusura è stata valutata da un punto di vista tecnologico, termico e igrometrico al fine di individuare il potenziale residuo e finalizzare maggiormente le successive linee guida di *retrofit*. I dati acquisiti sul campo sono stati integrati con i dati dimensionali provenienti dai tabulati del rilievo volumetrico forniti dal Comune di Apice, necessari all'elaborazione dei parametri dimensionali utili ai fini energetici (volume netto, superficie utile, superficie esterna lorda e rapporto S/V). Sono stati di conseguenza calcolati l'indice di prestazione energetica dell'involucro per la climatizzazione invernale $EP_{i,inv}$ (kWh/m³anno) e l'indice di prestazione energetica dell'involucro per la climatizzazione estiva $EP_{e,inv}$ (kWh/m³anno) relativi allo stato attuale del borgo.

¹⁴ Si veda, ad esempio, lo studio elaborato dal Centro Ricerche Architettura>Energia per il borgo storico di Caporciano, presentato nella scheda precedente.

.....

In relazione al repertorio di tecnologie costruttive rilevate e analizzate e alla valutazione delle prestazioni energetiche attuali dell'intero borgo storico, è stata successivamente elaborata la strategia di intervento finalizzata alla riqualificazione tecnologica ed energetica degli edifici in funzione delle prestazioni residue degli elementi tecnici, della destinazione d'uso, dei danni riportati a seguito degli eventi sismici. Sono stati dunque definiti due scenari di intervento, calcolate le prestazioni energetiche previsionali, le possibili integrazioni impiantistiche e di sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili, nonché valutate le opportunità di rientro economico degli investimenti.

In totale sono stati analizzati 233 edifici a fronte dei 313 totali del borgo storico, pari al 74,5%¹⁵. Il repertorio delle tecnologie costruttive rilevate è stato organizzato secondo una schedatura che permetta un'agile lettura dei materiali più ricorrenti e delle loro prestazioni energetiche e ambientali.

L'analisi dei dati di prestazione energetica e ambientale dei materiali che costituiscono le frontiere esterne degli edifici è stata condotta secondo la metodologia di calcolo descritta nella UNI TS 11300-1 (*parametri di trasmissione termica dei componenti di involucro*). Tale analisi termica delle tipologie costruttive storiche presenti nel borgo ha evidenziato la reale difficoltà di calcolo della trasmittanza termica di alcune strutture quali ad esempio le murature a sacco, largamente diffuse nell'aggregato in analisi. Questa difficoltà può essere considerata un'ulteriore dimostrazione (oltre a quelle presentate in questa tesi attraverso i casi studio analizzati, *capitolo 7*) delle ipotesi alla base della ricerca. Si rimanda al *paragrafo 7.6.2* per un maggiore approfondimento su questo argomento.

Data la natura preliminare dello studio e dato l'elevato numero di edifici presenti nel borgo di Apice Vecchia, le analisi energetiche sono state condotte utilizzando una metodologia di valutazione parametrica derivante dall'esperienza di analisi *bottom-up*. Tale metodologia prevede la definizione di un determinato numero di dati di *benchmark* derivanti da analisi svolte su un campione di edifici rappresentativi dell'intero edificato. Successivamente, questi dati vengono parametrizzati sulla base delle caratteristiche di ogni singolo fabbricato del borgo (secondo parametri tipologici, tecnologici, dimensionali) per ottenerne gli indicatori di stato di fatto energetico. Questo processo consente di semplificare il complesso procedimento analitico richiesto per valutare le prestazioni energetiche degli edifici. Il sistema permette l'analisi semplificata e speditiva di interi *cluster* urbani garantendo un dato finale di $EP_{i,inv}$ e/o EP_{gi} caratteristico di ogni singolo edificio.

Per ottenere i dati di *benchmark* sono state condotte analisi energetiche di dettaglio (secondo la norma tecnica UNI TS 11300) su alcuni modelli, costruiti per descrivere le caratteristiche tipologiche,

¹⁵ Il mancato rilievo della restante quota di edifici è dipeso dall'impossibilità di accedere ad alcune zone del borgo, a causa della presenza di una cospicua vegetazione nelle strade o per ragioni di sicurezza.

tecnologiche e dimensionali più ricorrenti nel borgo. Sono stati elaborati 18 modelli in riferimento ai seguenti fattori:

- tipologia edilizia: edificio a schiera o edificio di testa. Questo primo fattore è indice della superficie esterna lorda (ovvero la superficie disperdente calore verso l'esterno), minore per gli edifici a schiera in quanto condividono con gli edifici adiacenti due pareti (adiabatiche, dove non avviene scambio di calore);
- caratteristica dimensionale: 1, 2 o 3 piani fuori terra (relativa ai locali occupati/riscaldati). Anche in questo caso il dato è indice di maggiore o minore superficie esterna lorda;
- caratteristica tecnologica: paramento murario esterno di colorazione chiara, media o scura (come indicato nelle UNI TS 11300). La colorazione esterna dell'edificio influenza l'accumulo termico da irraggiamento solare incidente (più scuro è il paramento, maggiore è la radiazione solare che catalizza). L'irraggiamento solare si trasforma in guadagno termico invernale e surriscaldamento estivo. Il calcolo di questi apporti è relativamente complesso e maggiormente difficile è la sua parametrizzazione (diverso è il caso delle altre specifiche tecnologiche dell'involucro tipo la trasmittanza termica, legata in modo lineare al dato dimensionale della superficie di cui è caratteristica); per questa ragione si è deciso di includerli nel calcolo dei dati di *benchmark*, evitando ulteriori complicazioni nell'applicazione del metodo di valutazione energetica parametrica.

Questi tre gruppi di fattori significano variabili nella composizione dei modelli.

Tali risultati sono stati in grado di fornire le informazioni necessarie per descrivere l'intero patrimonio energetico di Apice Vecchia.

I dati così ottenuti possono essere attribuiti a ciascun edificio del borgo caratterizzato dalla combinazione dei tre criteri prima descritti, per essere rielaborati sulla base delle caratteristiche specifiche di ogni singolo fabbricato. Il dato di base viene scomposto con criterio ponderato secondo il valore individuale di trasmittanza e secondo il valore reale di superficie disperdente. Ciò è fondamentale perché alcune componenti dell'involucro hanno un peso maggiore sulle dispersioni globali dell'involucro: tra queste la chiusura verticale e soprattutto la copertura. Le parti vengono poi incrementate, in caso di ponti termici, o ridotte, in caso di presenza di elementi *buffer* superiori (sottotetto) o inferiori (cantine semi-interrate o interrato), e infine sommate tra loro per ottenere il dato di $EP_{i,inv,base}$ o $EP_{e,inv,base}$ rappresentativo del singolo edificio.

La valutazione energetica degli edifici nei diversi scenari di riqualificazione è stata condotta in modo analogo a quanto descritto per lo stato di fatto. I 18 valori di consumo di base, derivanti dai relativi modelli, sono stati ricalcolati per ogni strategia di riqualificazione dell'involucro. Conclusa la fase descritta in precedenza, per gli scenari di riqualificazione è necessario includere l'apporto degli impianti, inesistenti allo stato di fatto e quindi non compresi nella prima valutazione.

È dunque possibile elaborare, per ogni edificio e per l'intero borgo, il dato di EP_{gl} . La rielaborazione delle informazioni tecnologiche e dimensionali ha permesso di valutare, per ciascun edificio rilevato, l'indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale ($EP_{i, invol}$)¹⁶, con media pari a 39,41 kWh/m³anno, e l'indice di prestazione energetica per climatizzazione estiva ($EP_{e, invol}$), con media pari a 4,16 kWh/m³anno. I dati energetici dimostrano dunque che i fabbricati presentano un comportamento invernale poco performante, che richiede interventi incisivi finalizzati al contenimento delle dispersioni termiche, e un comportamento estivo molto buono da valorizzare. Tali caratteristiche orientano fortemente la strategia di intervento. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla consultazione del documento elaborato a conclusione dello studio.¹⁷

Risparmiare il passato

*Il progetto per il quartiere Barca a Bologna come esempio di riqualificazione energetica dell'edilizia residenziale pubblica*¹⁸

(Centro Ricerche Architettura>Energia)

La riqualificazione del patrimonio edilizio del quartiere Barca pone il problema del confronto con progetti architettonici di grande qualità formale, appartenuti all'esperienza del secondo settennio Ina-Casa, come il progetto dell'architetto Vaccaro. Il quartiere ha un linguaggio formale molto forte caratterizzato dall'aggregazione di più edifici ad H che creano piccoli complessi a corte¹⁹. L'intero lotto è scandito dalla successione di diversi spazi a verde che coprono l'area insinuandosi intorno agli edifici. Sono presenti sono aree di verde pubblico, parchi semipubblici di pertinenza condominiale e giardini privati. Nel quartiere è possibile trovare tre scuole e attività commerciali di vario genere. Ad una prima analisi dello stato di fatto si nota la mancanza di una strategia urbanistica unificante, che permetta di vivere meglio gli spazi

¹⁶ Dato che non sono presenti impianti di climatizzazione invernale, non è possibile fornire i valori di prestazione globale (EP_{gl}) relativi allo stato di fatto energetico.

¹⁷ Belpoliti V., Boarin P., Calzolari M., Davoli P., *Metabolismo ambientale ed edilizia storica minore. Lettura critica degli elementi di controllo bioclimatico presenti nell'aggregato urbano di Apice Vecchia*, in «L'ufficio tecnico» n. 11/2012.

¹⁸ Studio curato dal Centro Architettura Energia in occasione del Workshop *Il futuro del costruito. Riqualificazione energetica e Piano Casa*, tenutosi al Saie 2009 presso BolognaFiere.

Si veda anche:

Arbizzani E., Avosani G., Calzolari M., Magarotto L., Vanucci C., *Riqualificazione urbana, funzionale ed energetico – ambientale del quartiere Barca di Bologna*, «L'ufficio tecnico», n. 9/2010;

Calzolari M., 2010, *Risparmiare il passato. Il progetto per il quartiere Barca a Bologna come esempio di riqualificazione energetica dell'edilizia residenziale pubblica*, in P. Davoli, a cura di, "Il Recupero energetico e ambientale del costruito", Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, p. 69.

¹⁹ Complesso residenziale gestito da ACER Bologna (Azienda Casa Emilia Romagna).

pubblici. Per un corretto approccio di riqualificazione dell'esistente è necessario spostare il problema dalla scala dell'edificio a quella di quartiere. L'intervento sull'edificio è finalizzato al recupero delle peculiarità dell'area, per migliorarne gli aspetti specifici di carattere ambientale e socio-culturale. I principali obiettivi riguardano nuove strategie di controllo della mobilità del quartiere, sia sulle strade a scorrimento sia per quelle di attraversamento, delle aree verdi pubbliche e dell'inquinamento acustico. Intervenedo su questi aspetti si ricercano nuove visuali urbane, per una percezione migliore degli spazi di vita, un controllo termico degli ambienti e un *mix* culturale che interagisce a livello di quartiere, per una nuova sostenibilità sociale.

Il fabbricato oggetto di approfondimento ha una pianta a forma di H, su pilotis, con accesso dal vano scale posto al centro del corpo di fabbrica. Ciascun piano dell'edificio ospita quattro unità abitative. Lo spazio a piano terra, originariamente vuoto, è stato saturato in molte sue parti da costruzioni spontanee degli abitanti, in tempi recenti. Questo dimostra la necessità da parte dei fruitori di spazi di servizio da affiancare agli appartamenti.

Il regolamento urbanistico edilizio di Bologna prevede un premio del 20% di edificabilità per gli interventi che abbassino il fabbisogno di energia primaria sotto i 40 kWh/m² anno.

In fase di progetto è stata avanzata la proposta di estendere tale bonus al 30%, a fronte di un'ulteriore abbassamento dei fabbisogni energetici previsti per il quartiere.

Questa possibilità permette di proporre l'introduzione di nuovi blocchi di funzioni per gli edifici, pensati come parziale saturazione del piano terra, compatibili con la struttura originale a Pilotis, in sostituzione delle costruzioni spontanee realizzate in maniera disordinata, eterogenea e senza alcun controllo architettonico.

Le nuove dotazioni ridefiniscono lo spazio comune del piano terra, prevedendo nuovi moduli abitativi e di servizio che accolgano funzioni per la collettività, diventando, quindi, occasione di rivitalizzazione degli spazi pubblici. Il progetto si basa su un modulo di 4,2 x 4,2 metri, definito dall'interasse dei pilastri. La possibilità di sviluppare l'edificio attraverso l'aggregazione del modulo permette di replicare il progetto ai diversi edifici, per tutto il quartiere in base alle specifiche necessità. Il rivestimento dei fronti in doghe di legno sbiancate, insieme ad una forma a parallelepipedo molto semplice, conferisce all'intervento di densificazione del piano terra un linguaggio architettonico assolutamente neutro, seppur suggestivo, nei confronti del contesto in cui si inserisce. La nuova progettazione garantisce, per i moduli abitativi, livelli di *comfort* ambientale rispondenti alle richieste della normativa esistente. Le chiusure verticali e orizzontali sono costituite da una struttura a *platform* (6x12cm), isolata all'interno con pannelli in fibra di legno di 12 cm e con un cappotto esterno in polistirolo espanso di 5 cm ($U \text{ parete} = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$).

La ristrutturazione degli alloggi superiori esistenti mira al miglioramento delle prestazioni del sistema

edificio - impianto; la prospettiva di garantire una maggiore diversificazione sociale e il miglioramento del *comfort* interno ha portato alla differenziazione del taglio e delle dotazioni dei singoli alloggi. Ipotizzando la rimozione delle tramezzature esistenti, la distribuzione è riorganizzata tramite l'inserimento di moduli funzionali che contengono la dotazione impiantistica (pannelli radianti a parete) e i blocchi di servizio (cucina, bagno, armadi, logge). Questo permette di sfruttare meglio lo spazio dedicato agli alloggi garantendo un'efficace circolazione all'interno degli appartamenti.

Le logge, presenti sui fronti Est/Ovest non hanno, allo stato di fatto, nessuna protezione nella stagione estiva dall'irraggiamento solare. Il progetto prevede di realizzare un sistema di sostegno per rampicanti, che creano sulla facciata una fascia di "verde frangisole" che collega concettualmente il costruito al verde circostante. Nei mesi più caldi, il verde di facciata protegge le vetrate evitando il surriscaldamento degli ambienti. Si prevede di raffrescare gli alloggi tramite bocchette di ventilazione ricavate sulle pareti di divisione con il vano scale. Questo ultimo spazio si trova al centro dell'edificio in una zona, di giorno, sempre in ombra; questo fa sì che diventi un camino di ventilazione che aiuta ad espellere l'aria calda attraverso le aperture in sommità, distribuendo ai vari piani aria più fresca rispetto all'esterno. Di notte, aprendo le finestre delle logge è possibile allontanare, tramite il camino di ventilazione, l'aria calda che si forma all'interno dei vani. Il rampicante scelto per le logge è a foglia caduca per garantire un corretto apporto solare nella stagione invernale.

L'analisi energetica dell'edificio è stata condotta attraverso indagini acustiche, con fonometro, indagini termiche, con il supporto di una termo-camera e il calcolo dell'indice di prestazione energetica delle singole componenti edilizie. Il sistema di produzione di calore per l'impianto di climatizzazione è il teleriscaldamento, che garantirebbe un elevato standard di efficienza energetica. Le sue potenzialità sono, però, vanificate dal consistente valore di dispersione di calore delle componenti edilizie, progettate senza isolamento termico. Come si evince dall'analisi termografica infatti, il contributo peggiore nel bilancio termico calcolato su base mensile è dato dalle pareti e dalle vetrate. È molto rilevante l'incidenza sulla prestazione energetica globale delle travi marcapiano e dei pilastri in cemento armato, visibili in facciata, che si comportano come un elevato ponte termico. La quantità di energia primaria necessaria in un anno per l'edificio, prima dell'intervento, è 241 KWh/m² anno, in classe di prestazione energetica G.

Il rilievo acustico è stato eseguito in due distinte fasi. La prima fase riguarda l'analisi delle prestazioni acustiche dell'involucro edilizio nella sua configurazione "totale", risultante dalla somma dei poteri fonoisolanti e fonoassorbenti delle componenti edilizie.

La seconda fase riguarda l'analisi della qualità del clima acustico interno e la determinazione del tempo di riverberazione all'interno degli ambienti. La stima speditiva del potere fono isolante in facciata è stato stimato in $R'w = 23$ db.

L'intervento tecnologico sull'edificio mira al mantenimento del suo aspetto materico originale, caratterizzato dal rivestimento esterno in laterizio. La facciata è scandita da una trama di mattoni che conferisce al fabbricato il valore documentale che gli viene oggi riconosciuto. L'intervento non può prescindere dalla conservazione di questo linguaggio, cercando, contemporaneamente, di garantire i livelli di contenimento energetico richiesti dalla normativa vigente. Per questa ragione, la necessità di isolare l'edificio prevede che la nuova stratigrafia sia riprogettata dall'interno, attraverso la realizzazione di un isolamento a cappotto con sistema multistrato riflettente. Lo strato isolante ha uno spessore di 22 mm e viene installato tra due lame d'aria statica di 20 mm. In questo modo, lo spessore complessivo del sistema è di 6 cm, molto ridotto rispetto ad altri isolanti tradizionali, ma con medesimi valori di resistenza termica (valori di $R = 5,6 \text{mqK/W}$, equivalenti a 20 cm di EPS). Così facendo si possono garantire livelli di *comfort* acustico superiori ai minimi stabiliti dalla normativa.²⁰ Il ridotto spazio occupato dall'isolante permette di migliorare la prestazione termica ed acustica della parete senza diminuire la superficie interna utile degli ambienti, già al limite della normativa. Sostituendo, inoltre, i 7 cm di laterizio forato della stratigrafia originale con 25 cm di laterizio porizzato è possibile aumentare l'inerzia termica della chiusura, per garantire una buona prestazione anche in regime estivo. Si è ritenuto necessario isolare il solaio del primo piano che comunica con il sottostante spazio aperto pilastro sottostante per limitare le dispersioni con l'esterno e i solai interpiano, per garantire un maggior confort acustico tra alloggi. La necessità di non alterare l'altezza interna degli ambienti (2,70 m allo stato di fatto), ha reso necessario ripensare la stratigrafia anche delle chiusure orizzontali. Sopra al solaio originale in latero - cemento è stato previsto un materassino in feltro isolante di aerogel di 0,6 cm, che dà ottimi valori di isolamento a fronte di uno spessore molto ridotto ($R = 0,42 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Il cappotto interno coinvolge l'intero involucro edilizio isolando anche la copertura. Approfittando dei lavori di rifacimento del solaio di chiusura superiore si è sperimentata la possibilità di installare un impianto fotovoltaico sulle falde Sud ed Est. Le altre falde sono trattate con una vernice riflettente a base minerale con un'elevata emissività (*cool roof*).

L'applicazione delle tecnologie proposte per la riqualificazione energetica dell'edificio migliora in maniera significativa il bilancio complessivo del fabbricato. Allo stato di progetto il fabbisogno di energia primaria necessaria in un anno per l'edificio è 26 kWh/mq anno, in classe energetica A.

Con la riqualificazione dell'edificio si è colta l'opportunità di rivalutare il costruito, conservandone il patrimonio e migliorandone la fruibilità. Per realizzare tale obiettivo è necessario garantire il recupero degli investimenti spesi: l'energia primaria impiegata per il riscaldamento dopo l'intervento scende a meno di un ottavo di quella iniziale. L'inserimento di 11kWp di fotovoltaico amorfo sulla copertura di ciascun edificio

²⁰ Valori dichiarati nelle schede tecniche del prodotto.

contribuisce al sostegno energetico dei fabbricati e al rientro del capitale investito, vendendo l'eccedenza di elettricità in Conto Energia. A questo si aggiunge che la diversificazione degli alloggi data dalla nuova distribuzione interna apre ad una maggiore offerta in termini di locazione e vendita degli immobili. Il totale dei guadagni previsti con il nuovo intervento permette di stimare il rientro del costo di investimento in 16 anni.

Miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia storica: tra istanze conservative e prestazionali²¹

(Centro Labora)

Il Centro Ricerca *Labora*, area disciplinare del restauro architettonico, Dipartimento di Architettura di Ferrara, ha avviato un percorso di ricerca che, sfruttando gli studi tuttora in corso sulla città storica di Ferrara (*Processo di formazione e stratificazione e caratteri morfologici e costruttivi dell'edilizia storica di base*) affronta il problema dell'efficienza energetica partendo dalla scala dell'aggregato urbano fino all'approfondimento dell'organismo edilizio.

La ricerca si divide essenzialmente in due fasi, distinte tra l'analisi qualitativa e l'analisi quantitativa dello stato di fatto.

La prima parte della ricerca ha come obiettivo prevalente quello di proporre un'analisi qualitativa dello stato di fatto dell'efficienza energetica dell'edificio pre – industriale e nel caso più concreto dell'edilizia di base ferrarese, attraverso fattori di forza e di debolezza che interagiscono nella definizione dell'efficienza energetica propria di tale contesto. La ricerca vuole evidenziare il ruolo fondamentale dell'aggregato urbano nella valutazione dell'efficienza energetica del singolo volume architettonico, prendendo in considerazione parametri di interferenze tra le parti, attualmente non presi in considerazione in maniera opportuna dalla normativa di calcolo.

I fattori riconosciuti dall'analisi degli aggregati edilizi appartengono a quattro famiglie tematiche che devono essere messe a sistema tra loro:

- sistema aggregato;
- caratteri morfologici e costruttivi;
- modi d'uso;
- sistema impiantistico.

²¹ Ricerche di dottorato degli architetti Keoma Ambrogio e Marco Zuppiroli, tutor prof. arch. Rita Fabbri. Ricerca iniziata nel 2008. Cfr: Ambrogio K., Dalla Negra R., 2010, *Miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia storica: tra istanze conservative e prestazionali*, in P. Davoli, a cura di, *op.cit.*, p. 29.

La seconda fase della ricerca ha come obiettivo la caratterizzazione quantitativa dello stato di fatto dell'efficienza energetica dell'edificio pre – industriale. Lo studio prevede di mettere a sistema l'analisi dei fattori individuati con la prima fase della ricerca, con i dati di consumo degli aggregati presi come casi studio.

La correlazione dei dati è strutturata attraverso la predisposizione di un database relazionale (tipo G.I.S.) che, partendo dal modello descrittivo risultato dell'analisi qualitativa, possa interrogare i singoli fattori o insiemi di questi in relazione ai dati di consumo. Questo strumento intende consentire la conoscenza del livello di efficientamento dell'aggregato e delle sue parti (edifici), individuando i punti deboli del sistema. Inoltre, tale strumento deve servire a elaborare una valutazione progettuale degli interventi più opportuni per l'aggregato interagendo su una molteplicità di aspetti (sistema impiantistico, involucro, fonti rinnovabili, ecc.) entro un quadro economico sostenibile e con approccio conservativo.

Fine ultimo della ricerca, nel suo insieme, è stato definire linee guida per il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edilizia storica di base, perché costituiscano uno strumento in grado di guidare l'intervento in un'ottica che sappia tenere conto del valore storico – testimoniale dell'edificio e, contemporaneamente, delle esigenze di efficienza energetica.

SCHEDA N. 6

Protocollo GBC Italia Edifici Storici²²

GBC Italia, in accordo con US GBC, sta sviluppando un nuovo protocollo di certificazione per gli edifici storici.

L'obiettivo del progetto è la redazione di un protocollo di certificazione volontaria del livello di sostenibilità degli interventi di conservazione, manutenzione, recupero ed integrazione di manufatti pre-industriali. Questo strumento trova fondamento nel confronto e nell'unione di due diverse culture: i criteri di sostenibilità dello standard LEED® e il patrimonio di conoscenze proprie del settore del restauro.

Si basa sul protocollo LEED 2009 Italia Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni, la versione di certificazione adattata al contesto italiano del protocollo LEED *New Construction and Major Renovation*, adottato in tutto il mondo. Rispetto al protocollo sviluppato per le nuove costruzioni, quello sugli edifici storici intende coprire il segmento delle *Major Renovations*, cioè le Ristrutturazioni Importanti, gli interventi che coinvolgono gli elementi rilevanti degli impianti di climatizzazione e il rinnovo o la riorganizzazione

²² Il *Green Building Council* Italia è un'associazione no profit che fa parte della rete internazionale dei GBC presenti in molti altri paesi (paese originale Stati Uniti D'America-USGBC) che ha l'obiettivo di favorire e accelerare la diffusione di una cultura dell'edilizia sostenibile. USGBC nel 2000 ha sviluppato e diffuso il sistema di certificazione volontaria LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), che definisce nuovi criteri di progettazione degli edifici. Il sistema di certificazione è stato esportato in Italia nel 2010.

funzionale degli spazi interni, valutando le possibilità di miglioramento prestazionale dell'involucro edilizio. Per gli interventi minori si utilizza invece il protocollo LEED Existing Buildings: Operations & Maintenance che esiste già.

La novità del protocollo è l'aggiunta di una nuova area tematica chiamata "Valenza storica" che raccoglie tutte le indicazioni più specifiche finalizzate al restauro e alla riqualificazione in chiave sostenibile. Si prevede, inoltre di aggiungere delle integrazioni ai crediti esistenti nelle singole aree tematiche per adattarle al contesto degli edifici storici.

Una volta rilasciata la versione beta del protocollo si attendono le candidature dei "casi pilota" per un periodo di beta testing di un anno circa, dopo il quale verrà rilasciato il protocollo definitivo, eventualmente aggiornato sulla base delle simulazioni sui progetti reali.

I lavori per la messa a punto di questo nuovo strumento di certificazione sono ancora in corso. I primi risultati applicativi sono previsti per la fine del 2013.

4.2. Valutazioni critiche

4.2.1. Analisi dei principali risultati delle ricerche presentate

Le ricerche presentate in questo capitolo hanno evidenziato principalmente come il crescente interesse verso il tema della riqualificazione energetica degli edifici storici sia confermato dal proliferare di studi in merito. Esse sono state condotte sia da enti di ricerca, sia da istituzioni pubbliche per molteplici ragioni, fra cui la volontà, recente, di ottemperare alle indicazioni della legislazione vigente in termini di efficienza energetica per gli edifici storici, anche se non espressamente richiesto dalla normativa.

Sempre più spesso, si interviene anche sull'architettura del passato con l'obiettivo di migliorarne la prestazione energetica, per raggiungere livelli di *comfort* negli ambienti interni più alti rispetto al passato. Questa esigenza è sempre più stringente e spinge i progettisti a studiare nuovi interventi per il miglioramento delle prestazioni termiche dell'involucro o del rendimento della componente impiantistica. Pertanto è opportuno controllare questo fenomeno, affinché le operazioni effettuate siano compatibili con il rispetto dei caratteri tipici del fabbricato antico.

Inoltre, i proprietari degli immobili, pubblici o privati, spesso cercano di sfruttare le operazioni di riqualificazione energetica sui propri edifici, come occasione per migliorarne l'impatto sociale, adeguandoli alle prestazioni raggiunte dagli altri edifici presenti nel tessuto urbano, per aumentarne contestualmente il valore economico. Infatti, la reinterpretazione del costruito storico in funzione delle sue originarie capacità energetico - ambientali consente di restituire agli edifici la qualità che li ha contraddistinti fin dalle origini, invece di perderle a causa di interventi mal ponderati.

A fianco delle considerazioni funzionali e prestazionali si inseriscono anche esigenze di tipo economico. Sembra sempre più improcrastinabile l'esigenza di una gestione più attenta del patrimonio edilizio storico, che oggi rappresenta una spesa economica ed energetica rilevante (anche in riferimento ai regolamenti in materia di efficienza energetica). La possibilità di intervenire energeticamente sui nuclei urbani storici rappresenta, in alcune particolari situazioni, come l'abbandono, i disastri ambientali, o la recessione economica, l'occasione per la valorizzazione e l'implementazione di nuove politiche economiche di interi aggregati urbani, altrimenti esclusi dalle dinamiche sociali tradizionali. La riqualificazione, può, pertanto, diventare il motore dello sviluppo economico e sociale del panorama edilizio storico.

Gli elementi comuni a tutte le ricerche analizzate riguardano, principalmente, l'approccio al manufatto storico nella prima fase di progettazione degli interventi. Questa particolare attenzione appare più evidente per il panorama edilizio storico rispetto a quello contemporaneo e influisce maggiormente sulle strategie di riqualificazione possibili.

È condivisa la necessità di porre particolare cura nell'analisi di due aspetti principali: da un lato la relazione tra edificio e contesto di inserimento e dall'altro la specificità dell'oggetto edilizio antico.²³

Con *relazione edificio-contesto di inserimento* si intendono i:

- a. vincoli imposti all'edificio dal contesto in cui si inserisce, che sia esso ambiente, paesaggio, architettura;
- b. condizioni ambientali e climatiche dell'area di intervento, quali temperatura, umidità, pressione, direzione e intensità del vento, precipitazioni, irraggiamento del sole, copertura nuvolosa.

Con l'espressione *Specificità dell'oggetto edilizio antico*, invece, si sintetizzano tutte le invarianti legate a:

- a. conoscenza dell'architettura tradizionale, intesa come l'insieme degli aspetti relativi all'evoluzione storica, assetto, tipologia edilizia, aspetti distributivi, materiali e tecnologie costruttive;
- b. individuazione di alcuni dati di *benchmark* come l'epoca di costruzione, la destinazione d'uso, il grado di tutela, la presenza di elementi decorativi rilevanti e la riconoscibilità di alcuni elementi di controllo ambientale derivanti dal *buonsenso ambientale* tipico dei costruttori del passato.

²³ Cfr. Calzolari M., Zaffagnini T., Zannoni G., *Approcci interdisciplinari e problematiche invarianti per la riqualificazione energetica e ambientale del patrimonio costruito nell'area mediterranea*, atti del seminario estivo Osdotta 2010 «Permanenze e innovazioni nel Mediterraneo», Palermo, 15-17 Settembre 2010, Firenze University Press, p. 97.

Ciò che appare chiaro dall'elaborazione dei dati è la diffusa convinzione che sia necessario, per programmare un intervento di riqualificazione, una conoscenza profonda dell'oggetto analizzato e che questo sistema di comprensione si configuri, esso stesso, come parte integrante del processo e, come tale, possa pesare fortemente sulle decisioni future di intervento.

Pertanto, il punto di partenza di questo tipo di attività è rappresentato dalla definizione di un *quadro conoscitivo* del manufatto che ne costituisce il fondamento per un nuovo approccio alla progettazione.

Nei metodi proposti, che rappresentano, ad oggi, lo stato dell'arte in materia, si fa riferimento all'analisi dei soli aspetti dell'edificio che dipendono dalle sue caratteristiche esplicite, ma non si evidenzia come debba essere considerata anche la prestazione energetica intrinseca dell'edificio stesso, presa come l'insieme di tutti gli aspetti prima citati (relazione edificio – contesto e specificità dell'oggetto), non sempre così facilmente generalizzabili per tutti i fabbricati antichi.

Come si sottolineava nel *capitolo 1*, ad oggi, la valutazione delle capacità energetiche degli edifici esistenti storici viene condotta utilizzando il metodo studiato e messo a punto per gli edifici nuovi o di recente costruzione.

Come dimostrano esempi come quello presentato dallo studio dell'Università di Chieti Pescara (si veda *scheda 4 - Retrofit energetico ed edificato storico*), la valutazione dell'indice di prestazione energetica (EP) eseguita seguendo il procedimento di verifica consigliato dalla normativa vigente (che considera solo la trasmittanza termica dell'involucro) avrebbe portato a proporre un intervento sovradimensionato rispetto alle reali esigenze dell'edificio, che non avrebbe tenuto conto delle capacità ambientali intrinseche del fabbricato e del suo involucro così come si presenta allo stato di fatto.

Questo esempio evidenzia come, una conoscenza del fabbricato più corretta possibile permetta di valutare in maniera più appropriata gli interventi, evitando soluzioni che potrebbero peggiorare la prestazione dell'edificio, invece di migliorarla. Il caso descritto mette in luce la necessità di verificare la bontà del metodo di calcolo attualmente utilizzato, se applicato al particolare caso dell'edilizia storica.

4.2.2. Elaborazione di un quadro sinottico delle principali fasi di intervento di riqualificazione energetica e ambientale di un edificio storico

In base allo stato di fatto relativo alla definizione di linee guida per l'intervento di riqualificazione energetica di edifici storici e alle considerazioni fatte precedentemente durante l'analisi di tali strategie, è stato elaborato un quadro sinottico che riassume le principali fasi dell'intervento.

In particolare sono state evidenziate quattro macro fasi (*Figura 4.1*).

FASE A - Metaprogetto: rilevamento delle esigenze.

Durante questa fase si definiscono ed esplicitano le esigenze che hanno richiesto l'intervento. Le ragioni derivano principalmente dalla natura del proprietario del bene (pubblico e privato) da cui dipendono sostanzialmente decisioni di natura economica (gestione del bene) e di miglioramento del comfort all'interno del fabbricato (utilizzo del bene). In base alla finalità dell'intervento si programma un'opportuna campagna di studio dell'edificio stesso.

FASE B - Conoscenza dell'oggetto edilizio: documentazione architettonica.

Questo è il momento comunemente dedicato allo studio dell'edificio in rapporto alle caratteristiche che contraddistinguono l'intorno. E' la fase dell'elaborazione del quadro relazionale tra edificio e contesto di inserimento. In questa fase è necessario stabilire le radici culturali e tecnologiche che hanno portato alla realizzazione del particolare oggetto edilizio, che influenzano, oggi come al momento della costruzione, la scelta dei materiali e delle strategie di intervento.

FASE C - Programmazione dell'intervento: riqualificazione energetica e ambientale.

In questa fase si definiscono tutti gli aspetti del progetto di riqualificazione energetica e ambientale dell'edificio. Attraverso il rilievo architettonico e quello energetico, si conoscono a fondo le peculiarità dell'edificio allo stato di fatto, per definire gli interventi compatibili con queste caratteristiche e con le esigenze di miglioramento evidenziate durante la prima fase. È in questo momento che va data maggiore attenzione al rilievo energetico del fabbricato, per conoscerne il comportamento energetico prima dell'intervento e su queste considerazioni impostare la linea progettuale.

Il contributo della ricerca di dottorato si inserisce in questa fase, in riferimento al momento del rilievo energetico e della conoscenza del "funzionamento ambientale" dell'edificio *prima* dell'intervento, al momento della programmazione.

FASE D - Verifica dell'intervento.

L'ultima fase del processo è quella della verifica della virtuosità delle scelte effettuate, svolta prima dell'intervento, attraverso valutazioni e simulazioni dell'influenza dell'intervento sull'edificio, e dopo il provvedimento, attraverso il monitoraggio del reale miglioramento del comportamento energetico dell'edificio.

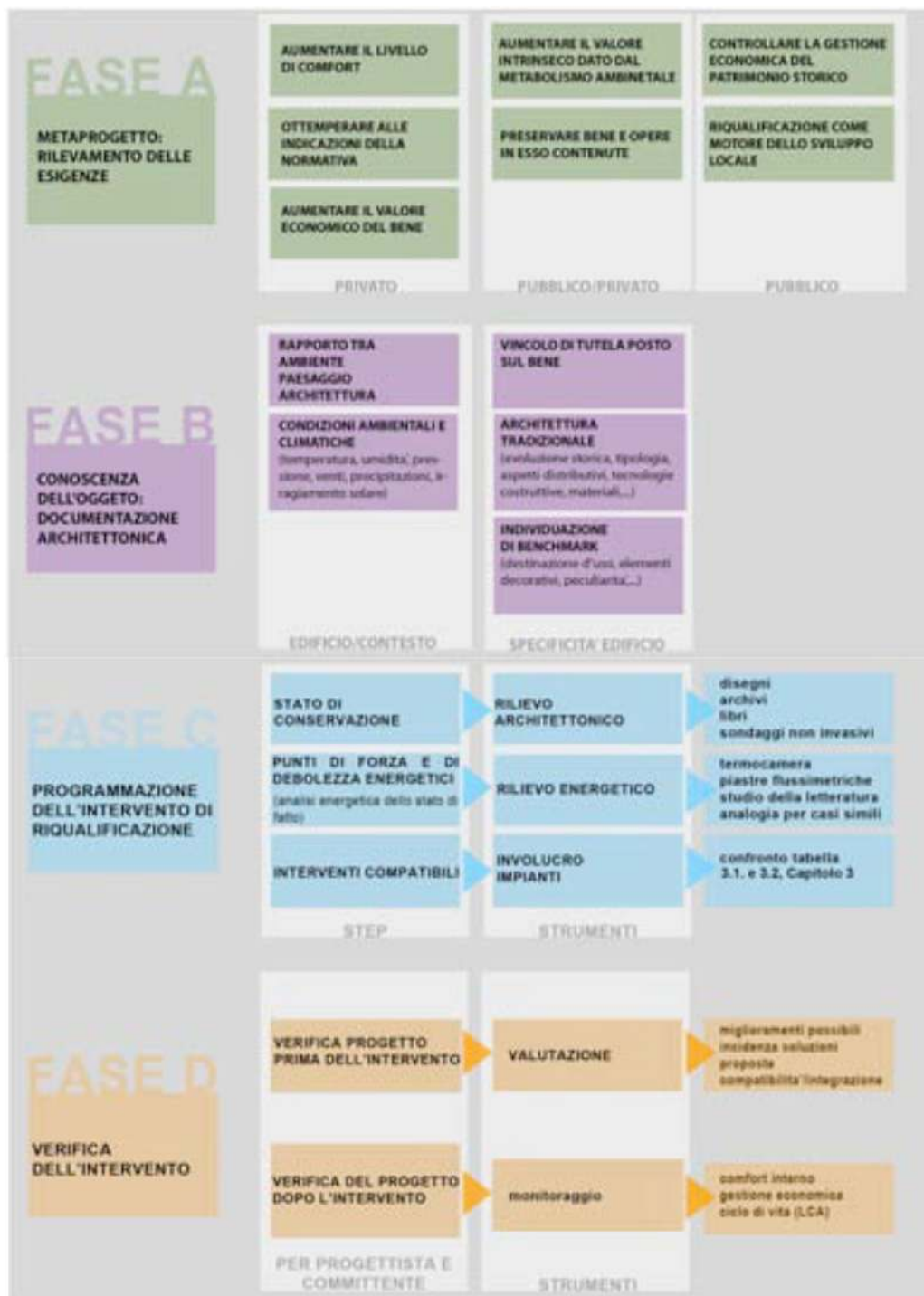


Figura 4.1. Schematizzazione delle principali fasi di un intervento di riqualificazione energetica di un edificio storico.

Marta Calzolari, *Valutazione del comportamento energetico dell'architettura storica. Analisi dei metodi di calcolo dello stato di fatto energetico e proposte correttive.*

Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura ICAR/12, XXV ciclo, Università degli Studi di Ferrara, 2010-2012

Capitolo 5. Ricerche nazionali orientate alla valutazione del metodo di calcolo del comportamento energetico allo stato di fatto

Il capitolo 5 rappresenta lo stato dell'arte in riferimento al tema specifico dei metodi di valutazione dell'efficienza energetica e della sostenibilità ambientale applicati agli edifici storici. L'obiettivo è analizzare quanto si stia facendo e quanto sia ancora da fare per definire un metodo di valutazione specifico per questa categoria di edifici.

5.1. Ricerche

Dopo un primo periodo di esperienze dirette sul campo, fatte senza un riferimento normativo o una guida operativa, il mondo della ricerca si sta interrogando sui *metodi* utilizzati per la gestione di un intervento energetico sul patrimonio storico, da un lato per definire linee guida di progettazione, dall'altro per verificare gli strumenti stessi di valutazione che vengono utilizzati oggi per dare avvio a queste operazioni. In particolare, l'attenzione alla fase iniziale di previsione delle prestazioni energetiche residue dell'edificio oggetto di riqualificazione, è piuttosto recente e ancora in via di sviluppo. Per questa ragione lo stato dell'arte specifico è in evoluzione e ne viene presentata soltanto una parte, che si ritiene interessante ai fini del presente lavoro.

SCHEDA N. 1

3ENCULT – Energia Efficiente per il Patrimonio Culturale Europeo¹

Il progetto riunisce università, enti di ricerca, imprese ed altri soggetti pubblici e privati con l'intento di sviluppare e testare soluzioni innovative per migliorare l'efficienza energetica degli edifici storici in area urbana. Il progetto si focalizza su edifici che svolgono una funzione pubblica o sociale.

L'obiettivo generale è migliorare la gestione dei flussi di energia in tale tipologia di edifici attraverso soluzioni attive e passive efficienti, convenienti e durature, adeguatamente monitorate e controllate, studiandone l'impatto sociale e ambientale nel contesto urbano di riferimento ed in considerazione della funzione storica e attuale degli edifici considerati. Il Comune di Bologna ha messo a disposizione Palazzo

¹ Programma di finanziamento: Settimo Programma Quadro di Ricerca e Sviluppo Tecnologico Inizio: 01/10/2010 Fine: 30/09/2014. Tra i partner del progetto c'è anche Eurac Bolzano (Accademia Europea di Bolzano, un centro di ricerca e formazione privato) che ha partecipato con il suo Istituto per le Energie Rinnovabili. L'istituto si è occupato, nel triennio 2008-2011, sempre all'interno del Settimo Programma Quadro, del progetto *Smooths (Smart Monitoring of Historic Structures)*.

d'Accursio quale caso di studio.

L'analisi dei diversi casi di studio permette di valutare le soluzioni sviluppate, a partire dalla realizzazione di studi di fattibilità, quale primo passo di una possibile riqualificazione energetica dell'edificio. Queste soluzioni permettono di trasferire i risultati del progetto ad altri edifici protetti e consentono di suggerire un'integrazione della EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive* – Direttiva sulla Performance Energetica degli Edifici²), che attualmente esclude gli edifici storici.

Il caso studio è guidato dall'Università di Bologna, che si occupa anche di effettuare una serie di sperimentazioni su un altro edificio storico, Palazzina della Viola, di proprietà dell'Università.

Il principale *topic* da cui prende avvio la ricerca è che sia necessario sviluppare una procedura di calcolo specifica per le *performance* energetiche degli edifici storici. Una volta sviluppato il metodo di calcolo specifico per le prestazioni energetiche degli edifici storici è necessario proporre un'integrazione agli *standard* di riferimento europei di classificazione energetica degli edifici storici.

Sulla base dell'esperienza maturata è possibile fornire degli strumenti di calcolo della prestazione energetica per i non esperti del settore, i professionisti comuni, che non sono preparati all'utilizzo di strumentazione di calcolo complessa.

SCHEDA N. 2

*Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici storici (Politecnico di Milano – Dipartimento BEST)*³

Nell'edificio storico, caratterizzato da tecniche costruttive diverse dalle recenti e dunque con comportamenti non assimilabili, è assai complesso determinare con esattezza numerica il comportamento dal punto di vista energetico, dunque è difficile agire per un adeguamento che fissi parametri assoluti senza avere chiaro quali prestazioni siano realmente offerte. Gli strumenti informatici oggi disponibili per il calcolo delle *performance* energetiche e per la relativa certificazione, lavorano in regime stazionario e non appaiono adeguati per l'analisi dell'esistente storico, mentre quelli operanti in regime dinamico (seppure di tipo semplificato, i cosiddetti *software* di *sketch design analysis*) mostrano comunque alcuni problemi. La ricerca ha testato alcuni di questi ultimi strumenti per capire se e in che modo possano essere impiegati per la modellazione dell'edificato storico. L'analisi del quadro generale e la parte sperimentale consentono di tracciare alcune proposte finalizzate alla stesura di linee guida in

² Si rimanda al capitolo 2.3 per maggiori dettagli legislativi.

³ Cfr: Adhikari R., Pracchi V., Rogora A., Rosina E., *La valutazione delle prestazioni energetiche negli edifici storici: sperimentazioni in corso*, in «ProgettoSostenibile», Edicom Edizioni, n. 28 Giugno 2011.

materia, che forniscano almeno le maggiori necessità individuate per un proseguimento proficuo della ricerca⁴. La conoscenza dello stato di fatto energetico di un edificio storico è particolarmente complessa a causa della presenza di tecniche costruttive superate, di materiali dal comportamento energetico differente tra loro e a causa di adeguamenti e modifiche sull'edificio stesso. Il comportamento termico degli edifici dipende in larga misura dall'inerzia termica delle murature e dal fatto che le strutture sono costituite da materiali che trattengono l'umidità. Gli strumenti e i metodi per indagare e modellare il comportamento termico degli edifici storici sono gli stessi utilizzati per valutare l'edilizia di nuova progettazione, mentre sarebbe opportuno considerare le specificità che contraddistinguono gli edifici antichi. La qualifica degli operatori e i tempi e costi per la realizzazione del modello termico (richiesto dai tradizionali *software* di calcolo energetico), la difficoltà di modellare situazioni "anomale" rispetto a quelle degli edifici esistenti non storici sono alcuni degli elementi che rendono difficile la modellazione.

Un obiettivo della ricerca è quello di capire se, e in che modo, i *software* di analisi e simulazione, nati per aiutare i progettisti nella fase preliminare di progettazione dell'intervento, siano utilizzabili se usati nell'analisi dell'architettura storica, che attualmente non dispone di strumenti dedicati.

La sperimentazione è stata condotta rilevando, per un anno, i valori di temperatura, umidità dell'aria e la loro oscillazione durante la giornata e le stagioni in alcuni edifici per capire quanto si discostassero da quelli simulati e per capire se i *software* tendessero a sottostimare o sovrastimare tali valori.

Le prime sperimentazioni svolte hanno dimostrato la non conformità dei risultati ottenuti con tre diversi *software*⁵, rispetto ai valori di temperatura e umidità dell'aria rilevati sul caso reale. I sistemi di calcolo tradizionali presentano dei limiti evidenti quando usati su edifici storici.

Lo sviluppo della ricerca mira a definire una procedura standardizzata che sia utile alla modellazione di edifici esistenti, cercando di sviluppare *software* dedicati all'edilizia storica.

4 La ricerca del Dipartimento BEST di Milano, a cura dei prof. Alessandro Rogora e prof. Valeria Pracchi è attualmente in corso, per cui non è possibile presentare i risultati definitivi del lavoro. Le radici e gli obiettivi del loro lavoro sono molto affini a quelli presentati in questa tesi. Ci sono state numerose occasioni di comunicazione e il progetto di future collaborazioni per il proseguimento, anche congiunto, delle due ricerche.

⁵ I *software* testati sono:

- CLACA, sviluppato dall'Università Politecnica della Catalogna, gruppo AIE;
- ARCHISUN, sviluppato all'interno del programma Thermie dalla School of Architecture of Barcelona con Institut Català d'Energia, dal Politecnico di Milano e dall'Universitat Hannover and A.N. Tombazis and associates;
- CASANOVA, sviluppato dall'Universitat Siegen.

SCHEDA N. 3

Energia e insediamento. Una ricerca interdisciplinare per l'applicazione di principi di efficienza energetica nei centri storici (Facoltà di Architettura di Sassari (sede di Alghero – Dipartimento di Architettura e Pianificazione)⁶

Lo studio, della Facoltà di Architettura di Sassari (sede di Alghero – Dipartimento di Architettura e Pianificazione) in collaborazione con il Comune di Osilo (Sassari), ha indagato i metodi per l'introduzione di principi di basso consumo energetico nei centri storici, attraverso un progetto pilota. Le misure effettuate su edifici di interesse storico, sia pure affette dalle incertezze tipiche delle prove sul posto, in condizioni non esattamente ripetibili, costituiscono un elemento importante della ricerca. Informazioni generali sui consumi e le abitudini energetiche di tali edifici sono state ricavate con un'indagine sul campo sviluppata attraverso la distribuzione di questionari, in modo da supplire alle difficoltà nel reperire dati energetici dai produttori e dai distributori.

Durante lo svolgimento della ricerca ha assunto notevole importanza l'uso di simulazioni *software* per l'indagine e la verifica delle condizioni di *comfort* degli spazi. Oltre a permettere una verifica quantitativa delle soluzioni proposte, il *software* svolge la funzione di raccordo tra le informazioni provenienti dai diversi campi di indagine: i dati sullo stato attuale delle abitazioni e la percezione delle condizioni di *comfort* al loro interno, le misurazioni del clima e delle caratteristiche dei materiali, le diverse alternative costruttive e formali. A partire da queste informazioni sono stati valutati i metodi che sembrano più appropriati per la riconversione ad un adeguato *standard* di *comfort* e di consumo energetico delle abitazioni del centro storico.

Lo studio della storia, delle trasformazioni e della morfologia insediativa dell'abitato di Osilo ha portato ad alcune considerazioni. La reale consistenza dell'aspetto compatto del comune può essere efficace nel limitare le dispersioni se rispettata sia in pianta sia in alzato. La sua efficienza può diminuire localmente a causa di discontinuità che aumentino il rapporto tra superficie in pianta e superficie laterale e quindi le dispersioni termiche. Sono stati riscontrati tre tipi di discontinuità, negli allineamenti in facciata e in gronda (anche di uno o due piani), nell'uso (dovuta a edifici abbandonati o comunque non riscaldati) e discontinuità modeste date dallo sfalsamento in altezza di abitazioni su strade con forte pendenza.

La compattezza, però, non sempre sembra essere un valore positivo perché in alcune situazioni particolari

⁶ Studio finanziato dalla Regione Sardegna nell'ambito del progetto *Camping for Take-off for Renewable Energies* (CTO), *Campagna per il decollo delle energie rinnovabili*, che fa parte della strategia e del piano della Comunità Europea sulle fonti energetiche rinnovabili.

Si veda: Spanedda F., a cura di, *Energia e insediamento. Una ricerca interdisciplinare per l'applicazione di principi di efficienza energetica nei centri storici*, FrancoAngeli Editore Metodi del Territorio, Milano, 2007.

il carattere di vie o spiazzi non sempre permette la sopraelevazione, oppure perché questo può influire negativamente sul soleggiamento delle strade o degli edifici (aspetto ritenuto importante sia per una questione energetica, sia per una esigenza di *comfort* espressa anche dai questionari effettuati).

Per calcolare l'influenza della compattezza sulle temperature interne sono state eseguite simulazioni software basate su rilievi condotti sull'edilizia storica che sono stati poi confrontati sui valori ottenuti sull'edificio isolato (la stessa casa a schiera calcolata senza l'influenza degli edifici attigui). Tutte le simulazioni sono state compiute a parità di condizioni al contorno (clima, materiali, etc) senza ipotizzare impianti di condizionamento e calibrando i periodi di analisi sulle giornate più fredde e più calde dell'anno. Durante la stagione fredda le temperature interne della casa isolata risultano inferiori anche di quattro gradi rispetto a quelle della casa a schiera. In estate, invece, la casa isolata risulta ugualmente svantaggiata, con scostamenti delle temperature interne di tre-quattro gradi.

Le simulazioni, condotte con il *softwareEsp-r⁷*, hanno permesso di valutare positivamente da un punto di vista quantitativo i benefici apportati dalla compattezza delle temperature interne e indirettamente sui consumi energetici.

Sono state condotte anche rilevazioni sul campo delle trasmittanze dei materiali. I muri di edifici tradizionali, seppure presentino nel complesso una bassa resistenza termica, hanno un'elevata inerzia che cambia il normale andamento del flusso termico costante in ogni sezione del muro. Quindi in murature caratterizzate da grandi spessori e masse elevate la costante di tempo tende ad essere elevata e la capacità di smorzare le fluttuazioni di temperatura (inerzia termica) altrettanto alte. Le misurazioni fatte sugli edifici campione mostrano queste considerazioni. I rilievi non permettono di determinare in maniera univoca la conduttività dei materiali per la difficoltà trovata a raggiungere alcune parti dell'edificio e perché alcuni rilievi sono stati svolti in primavera-estate, per cui il gradiente termico fra interno ed esterno è stato modesto e quindi il flusso termico assai scarso. Da ciò si è dedotto che la caratterizzazione di un edificio storico da un punto di vista dei consumi energetici richiede un'analisi sperimentale impegnativa e un modello dei transitori termici per interpretare gli andamenti misurati.

Le indagini hanno permesso di trarre interessanti conclusioni utili a veicolare le strategie di intervento sugli aggregati.

⁷ www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm.

5.2. Valutazioni critiche

Le ricerche presentate in questa seconda sessione hanno messo in luce alcuni problemi comuni nell'interpretazione del comportamento energetico degli edifici storici.

In primo luogo, gli strumenti usati oggi per indagare il comportamento termico dell'edilizia storica sono quelli nati per la valutazione di edifici di nuova costruzione e/o esistenti non storici. Questo implica che la modellazione e la simulazione energetica di situazioni "anomale" (tipiche degli edifici storici) rispetto a quelle di edifici esistenti non storici sono particolarmente difficili e non sempre possibili con gli strumenti a disposizione. Come si è visto nella scheda n. 2, la ricerca del Politecnico di Milano ha evidenziato una non conformità tra i risultati ottenuti con le simulazioni fatte con alcuni *software* e i dati rilevati. Le semplificazioni, proprie degli strumenti di modellazione *software*, sono più difficili da accettare per l'edificio storico perché la descrizione degli elementi tecnologici è troppo generale, la valutazione dell'inerzia termica delle strutture è molto complicata e la presenza di fenomeni di transitorio altera il normale calcolo della valutazione del flusso termico.

La caratterizzazione di un edificio storico da un punto di vista dei consumi energetici richiede un'analisi sperimentale impegnativa e un modello dei transitori termici. Gli strumenti necessari ad una valutazione, quanto più possibile vicina alla realtà, di tali fenomeni sono molto complessi da usare e prevedono l'ausilio di professionisti esperti. Non è possibile immaginare che simili valutazioni possano essere fatte, nella pratica quotidiana, da professionisti comuni.

Una valutazione dello stato di fatto energetico scorretta, o dissimile dalla realtà può avere, però, delle implicazioni notevoli.

Sul piano progettuale

Stimare scorrettamente le capacità termiche dei materiali che costituiscono l'involucro edilizio e il rapporto in termini di scambi termici tra gli ambienti dell'edificio, significa progettare interventi scorretti o ingiustificati, che oltre ad alterare l'estetica del fabbricato, potrebbero rappresentare una spesa onerosa poco giustificabile. In molti casi, le buone capacità termiche e di controllo ambientale degli edifici storici (inerzia termica, metabolismo ambientale, ecc.) possono, da sole, provvedere ad un controllo ambientale dell'edificio ed è sufficiente fare piccole integrazioni (coibentazione copertura o sostituzione infissi invece che un cappotto isolante su tutto l'involucro, per esempio), perché il livello prestazionale dell'edificio migliori sensibilmente.

Sul piano conservativo

Nelle operazioni di progettazione dell'intervento di riqualificazione energetica e ambientale di un edificio storico è necessario tenere presente anche la conservazione delle opere in esso contenute e degli

apparati decorativi del fabbricato stesso. Gli interventi, in particolare per quanto riguarda la progettazione di un impianto di condizionamento dell'aria (estivo e invernale), devono tenere conto di questa istanza e non creare negli ambienti un microclima adeguato soltanto al *comfort* degli utenti, ma scorretto per la manutenzione delle opere e delle pitture. Gli sbalzi di temperatura o livelli di umidità eccessivi sono tra le principali cause di degrado delle opere d'arte⁸. Conoscere le reali condizioni climatiche interne di un edificio storico può aiutare nella progettazione di soluzioni che, invece di compromettere l'edificio stesso, possono realmente aumentarne le prestazioni e le capacità di conservazione.

La conclusione di questa analisi è, pertanto, che manca, ancora, uno studio specifico e sistematico sul metodo di valutazione del comportamento energetico e ambientale degli edifici storici, che parta dall'analisi della normativa vigente in materia e la estenda al patrimonio tutelato.

A questo proposito la terza parte della tesi di dottorato si concentra sull'analisi dei metodi di valutazione oggi utilizzati e sulle normative tecniche di riferimento (*capitolo 7*) per evidenziare quali possano essere i futuri campi di ricerca per definire una normativa, in termini di efficienza energetica, specifica per l'edilizia storica.

Dopo un *excursus* sulle ricerche internazionali in merito alla riqualificazione energetica e ambientale di edifici storici (*capitolo 6*) seguiranno due capitoli centrali al tema di ricerca.

Nel *capitolo 7* saranno descritti i principali metodi di calcolo del fabbisogno energetico di un edificio, così come sono previsti dalla normativa nazionale vigente. Questi metodi sono stati testati su 14 casi studio per verificare la possibilità di applicazione della metodologia alla tipologia edilizia indagata. Dall'analisi delle simulazioni sui casi studio è stata sviluppata la valutazione critica del metodo di calcolo.

Nel *capitolo 8* è presentata la parte sperimentale della ricerca di dottorato, volta alla determinazione di un metodo di rilievo strumentale del coefficiente globale di scambio termico in un edificio storico, che possa rappresentare correttamente gli scambi termici di un architettura antica e il modello matematico che definisce lo scambio termico tra interno ed esterno in maniera semplice e intuitiva.

⁸ Cfr. Camuffo D., *Microclimate for Cultural Heritage*, «Developments in Atmospheric Science 23», Amsterdam, 1998.

Capitolo 6. Ricerche internazionali

Sebbene la ricerca sia strettamente legata al panorama edilizio storico italiano, di seguito viene presentato uno stato dell'arte delle ricerche elaborate fuori dai confini nazionali. In particolare questo capitolo ha l'obiettivo, ai fini della ricerca di dottorato, di evidenziare la necessità di un approccio conoscitivo completo prima di progettare un intervento di riqualificazione energetica e ambientale su un edificio storico. Le ricerche europee presentate sono per lo più finalizzate alla definizione di linee guida, ma mostrano, in generale, un approccio sperimentale orientato all'audit energetico più frequente di quanto accada nella pratica italiana. La scelta di analizzare e riportare per lo più ricerche europee, ad eccezione di alcuni casi, risiede nel fatto che l'approccio alla conservazione, al restauro e all'efficienza energetica nel resto del mondo (Australia, Asia, America) è diverso rispetto a quello europeo, perché si basa essenzialmente su un patrimonio storico molto differente, sia per tipologia sia per età di costruzione.

Questa parte della trattazione ha, pertanto, lo scopo di presentare l'approccio al tema della riqualificazione energetica e ambientale degli edifici storici, più che porre l'interesse sui singoli risultati delle diverse ricerche, dal momento che la tipologia edilizia analizzata è in molti casi piuttosto differente da quella italiana.

6.1. Ricerche - definizione di linee guida e buone pratiche

La trattazione dello stato dell'arte straniero è stata strutturata come quella dello stato delle ricerche italiane. Per questa ragione, le ricerche analizzate sono state separate in due paragrafi distinti. Nel primo, sono presentati gli studi finalizzati alla definizione di linee guida, mentre nel secondo quelli orientati all'analisi dei metodi di valutazione energetica e ambientale degli edifici. Le ricerche sono presentate in schede descrittive e poi analizzate in maniera critica, utile per gli obiettivi di questo lavoro.

SCHEMA 1

USA

Making your historic building energy efficiency¹

Il progetto per una corretta conservazione del patrimonio storico di Boulder, in riferimento anche agli aspetti di risparmio energetico, è stato presentato sin dal 1974. Il fatto di aver riconosciuto questa importante esigenza fin dall'inizio rende questo programma uno dei più interessanti degli Stati Uniti.

Il programma si articola come una vera guida rivolta ai proprietari di edifici storici perché possano conoscere le opportunità date da un intervento di riqualificazione energetica del proprio edificio e sappiano cosa va evitato quando si interviene su un fabbricato antico.

Lo studio è presentato in due volumi, il primo riguarda *Principi e approcci al problema dell'intervento energetico su edifici storici* e il secondo i *Dettagli tecnici*, all'interno dei quali sono descritte le principali indicazioni da seguire quando si interviene in u edificio storico.

Il problema più comune è rappresentato dalle perdite di calore per infiltrazione, per le quali isolare l'edificio potrebbe non essere sufficiente a risolvere il problema. Come illustrato in *figura 6.1*, durante la stagione invernale quando l'aria interna è più calda di quella esterna, una pressione negativa si genera alla base dell'edificio (infiltrazione), mentre una pressione positiva si genera nella parte alta dell'edificio, spingendo l'aria calda ad uscire dagli spifferi presenti nell'involucro. Più è alta la differenza di temperatura e maggiore è l'altezza dell'edificio, più il fenomeno sarà sensibile. Per questa ragione il fenomeno è rilevante negli edifici storici.

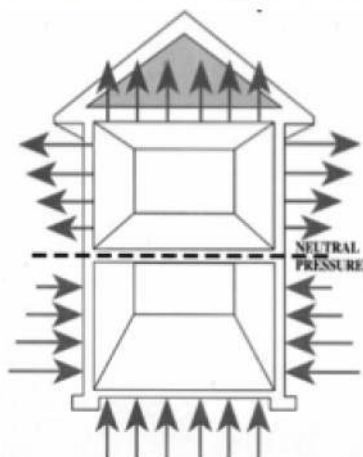


Figura 6.1.

Effetto di infiltrazione e uscita dal basso verso l'alto della aria all'interno dell'edificio².

¹ 2007-City of Boulder, Office of environmental Affairs by Synertech system Corporation-www.synertechcorporationsystemcorp.com

²Elaborazione tratta da *Making your historic building energy efficiency*, Volume 1 – *Principles and Approaches*, pagina 13.

Prima di progettare qualsiasi tipo di intervento è opportuno prevedere un *audit* energetico dell'edificio per stabilire priorità e opportunità delle scelte possibili e fare un'analisi costi benefici dell'intervento. Questo rilievo dell'esistente è definito dal programma: *Whole-House approach*.

Per l'edificio storico, infatti, non è sufficiente conoscere le informazioni generali della tipologia in esame ma è necessario conoscere il caso specifico e tutte le sue caratteristiche.

Per questo il programma prevede un *Energy audit* basato su analisi del consumo di energia, un rilievo strumentale e una verifica della condizione e dell'uso degli impianti.

Per gli edifici nuovi sono a disposizione tutti i disegni tecnici e i consumi sono facilmente stimabili (dati generali), mentre per l'edificio storico spesso non ci sono tali informazioni.

Per fare un buon rilievo energetico può essere utile:

- stabilire quale sia il rapporto tra l'uso di energia e le dimensioni dell'edificio;
- sapere quali siano i consumi mese per mese e come sono distribuiti nel corso dell'anno;
- conoscere il numero complessivo degli occupanti;
- sapere se il riscaldamento è elettrico o a gas.

Per quanto riguarda le perdite attraverso fessurazioni e ponti termici, molto è imputabile ai punti a cattiva tenuta presenti in posti nascosti dell'edificio. Per riconoscerli può essere utile fare il *Blower door test*, che consiste nel depressurizzare l'abitazione per vedere (con l'ausilio di una termocamera), le principali perdite di calore.

Nel volume della guida sono, poi, indicate le principali strategie di un intervento di riqualificazione energetica di un edificio storico.

Per ciascun capitolo sono indicati i sistemi di riqualificazione per l'involucro e per l'impianto che possono migliorare il comportamento complessivo dell'intero edificio.

Altri due programmi statunitensi molto simili a quello appena descritto sono:

- **Technical Preservation Service - Preserve and protect US Nationals Heritage** by Us Departement of the Interior, con il programma: *Weatherizing and improving the energy efficiency of historic buildings*³;
 - **Workshop on historic preservation and energy efficiency in federal buildings** by Federal Energy Management Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy⁴.
-

³ Si rimanda a: <http://www.nps.gov/tps/sustainability/energy-efficiency/weatherization.htm>

⁴ December 6-7, 2006, Decatur House Museum, Washington, DC.

SCHEDA 2
Estonia**HEALTH*****Healthy and Energy-efficient Living in Traditional Rural Houses******Technical survey of Estonian houses*⁵**

Il progetto è diviso in due fasi principali. La prima attività di ricerca è volta all'analisi della qualità di vita nei casi studio individuati e del loro livello tecnologico. I diversi ricercatori provenienti da Estonia, Svezia e Finlandia analizzano le differenti soluzioni di riscaldamento e ventilazione, compatibili con le caratteristiche degli edifici in esame, per ridurre i consumi di carburante e le emissioni di carbone in atmosfera e garantire, al contempo, condizioni interne salubri, una maggiore conservazione nel tempo dei manufatti, e prestazioni energetiche migliori. L'obiettivo è individuare, attraverso l'uso di *software* di simulazione, gli effetti che le soluzioni scelte nel processo di riqualificazione hanno sul *comfort* interno e sulla prestazione energetica e igrometrica dell'edificio.

La seconda fase riguarda l'*educazione* dei proprietari ad un uso energetico migliore delle proprie abitazioni. Il progetto mira a creare linee guida per i proprietari degli edifici volte alla sensibilizzazione per un buon utilizzo delle proprie case dal punto di vista energetico.

Gli obiettivi della ricerca sono:

1. determinare le principali criticità delle case rurali tradizionali, dipendenti dal loro comportamento energetico, dalle condizioni igrometriche interne e dallo stato di conservazione, attraverso un'indagine condotta su casi studio specifici;
2. trovare soluzioni alternative per la riqualificazione energetica di questa tipologia edilizia, per ridurre il consumo di energia e le emissioni di carbone, attraverso interventi sull'involucro e sulla componente impiantistica;
3. Innalzare il *comfort* nell'ambiente interno per migliorare le condizioni di vita degli abitanti.

Il progetto ha individuato come casi studio edifici rurali tradizionali costruiti prima del 1940 in parte climatizzati per tutto il corso dell'anno in parte senza un impianto di riscaldamento. Considerando la similitudine tra diversi edifici del patrimonio storico in esame e le condizioni climatiche e ambientali del contesto geografico, è possibile studiare il comportamento energetico degli edifici utilizzando dei modelli. Infatti, in Estonia e nell'area Sud della Finlandia il materiale utilizzato nella maggioranza dei casi è il legno,

⁵ Just A., *Healthy and Energy-efficient living in Traditional Rural Houses. Technical survey of Estonian houses*, Raport structure, Tallinn University of technology, Department of Structural Design, 2011; www.healthproject.eu. Durata del progetto: Settembre 2010-Aprile 2013.

mentre nella regione del Gotland (Svezia) il materiale prevalente è la pietra. Tutta l'area indagata presenta gli stessi bassi livelli di qualità dell'aria interna, di efficienza energetica e di condizioni di conservazione dei materiali impiegati. Per questo motivo è possibile utilizzare efficacemente il metodo di diagnosi energetica per analogia con casi simili.

La ricerca, attualmente in corso, prevede di effettuare una serie di misurazioni e simulazioni *software* delle condizioni climatiche interne, dell'efficienza energetica e delle prestazioni strutturali e igrometriche, dell'involucro.

La sezione delle misurazioni è cominciata con l'inventario dei granai-abitazione in Estonia (l'obiettivo è avere 526 casi studio entro l'Aprile 2013) per poi proseguire con le misurazioni della temperatura e dell'umidità interna (rilevate ad un intervallo di 1 ora per circa un anno), della temperatura esterna (attraverso una stazione meteo posta in zona limitrofa ai casi in analisi) e della ventilazione e delle infiltrazioni d'aria. Il ricambio d'aria è stato calcolato sulla base dei flussi d'aria esausti nelle condotte (negli edifici dove c'è l'impianto di ventilazione meccanica) e misurazioni *in situ*, attraverso il *blower door test* per stabilire la tenuta all'aria dell'involucro (sigillando condotte, finestre porte e camini). Con l'ausilio di una termocamera e una *smoke pen* sono stati individuati ponti termici e infiltrazioni. Successivamente, per stabilire la naturale ventilazione dell'edificio, sono stati condotti altri test lasciando l'edificio nella situazione normale (aperture e condotte non sigillate). Parallelamente alle misurazioni strumentali sono state condotte le simulazioni del comportamento energetico degli edifici campione;

I risultati della ricerca (previsti per Aprile 2013) permetteranno di definire uno scenario generale delle condizioni e delle maggiori criticità degli edifici rurali tradizionali in relazione a durabilità, condizioni climatiche interne, efficienza energetica, qualità della vita all'interno e costruire una casistica di soluzioni compatibili con tali edifici per il miglioramento del comportamento energetico e la riduzione di consumo di combustibile.

SCHEDA 3
Regno Unito (UK)

L'*Edinburgh World Heritage* (EWH)⁶ in collaborazione con *Change Works*⁷ ha sviluppato due progetti per la protezione e valorizzazione del patrimonio storico scozzese.

1) **ENERGY HERITAGE**: una guida per migliorare l'efficienza energetica degli edifici tradizionali e storici. Anno 2007/2008. (tema di interesse: involucro).

2) **RENEWABLE HERITAGE**: una guida sull'integrazione di impianti per la produzione di energia da fonte rinnovabile alla piccola scala negli edifici tradizionali e storici. Anno 2008/2009. (tema di interesse: impianto).

In entrambi i progetti, gli edifici di riferimento sono architetture vittoriane e georgiane costruite prima del 1919 nella *Edinburgh Old Town* e iscritte nella lista dell'Unesco dal 1995. Sono tutti edifici costruiti con tecnologie simili e materiali tradizionali (arenaria, legname, ardesia e vetri singoli).

Le soluzioni proposte e analizzate sono state poi testate su un caso studio comune: Lauriston Place (Edinburgh).

ENERGY HERITAGE (A guide to improve energy efficiency in traditional and historic homes)

La guida si articola in tre parti, create a partire dalla formulazione di tre domande provocatore sul tema.

A) Quali criticità sono legate alle operazioni di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici storici?

Questa prima parte mette in evidenza le caratteristiche degli edifici storici, l'importanza dell'efficienza energetica nell'ambiente domestico e i principali aspetti di sostenibilità ambientale. Inoltre analizza l'impatto del cambiamento climatico sugli edifici storici e il potere di discrezionalità e decisionale delle autorità competenti in questo settore.

Per gli edifici storici non è possibile definire strategie valide a priori ma ci sono alcune regole generali che suggeriscono soluzioni più compatibili e per questo adatte all'intervento su questa tipologia edilizia⁸.

⁶ *Edinburgh World Heritage* (EWH) è una associazione fondata grazie a donazioni da parte della municipalità della città di Edimburgo e della *Historic Scotland* (Agenzia direzionale del Governo Scozzese per la salvaguardia del patrimonio storico nazionale per la promozione della sua comprensione in nome dei Ministri Scozzesi <http://www.ewht.org.uk/>), con il compito di conservare, proteggere e promuovere il "City's World Heritage Site";

⁷ *Change Works – Resources for Life* lavora per promuovere progetti innovativi e business per la salvaguardia dell'ambiente. Le principali attività riguardano: l'aumento dell'efficienza energetica e l'uso di fonti di energia rinnovabili, prevenire la formazione di rifiuti promuovendo la raccolta differenziata e il riuso, promuovere metodi di trasporto a basso impatto ambientale. www.changeworks.org.uk;

⁸ Tutti gli interventi che possono modificare l'aspetto dell'edificio devono ottenere un consenso. Ci sono 3 tipi di consenso:

- *Planning Permission*, per le modifiche sull'esterno del fabbricato;
- *Listed building consent*, per qualsiasi modifica ad un edificio vincolato che ne coinvolga il carattere o le valenze storiche e

Le caratteristiche dell'edificio storico che principalmente ne influenzano, positivamente o negativamente, il comportamento energetico sono:

- elevata massa data da murature di grandi spessori;
- buona ventilazione naturale;
- grandi finestre con telai a bassa tenuta e molte infiltrazioni;
- altezze interne molto elevate che corrispondono a grandi volumi da riscaldare.

Gli strumenti in uso per il miglioramento energetico degli edifici sono:

- *Building Standards* > limiti energetici di riferimento per i componenti dell'edificio;
- *Energy Performance Certificates* > strumenti di certificazione energetica.

B) Quali opportunità offre il miglioramento energetico degli edifici storici?

Questa seconda parte rappresenta una guida verso le soluzioni più compatibili per interventi di riqualificazione energetica degli edifici storici.

La guida fornisce alcune indicazioni riguardo:

- **Finestre** (causa del 10% delle perdite di calore): considerazioni sulla possibilità di sostituire i vetri originali e sui vantaggi dati dalla aggiunta di una seconda finestra;
 - **Infiltrazioni d'aria** (causa del 15% delle perdite di calore): necessità di individuare i punti di dispersione più nascosti, oltre a quelli evidenti (telai delle finestre non a tenuta). Isolare l'involucro potrebbe non essere sufficiente a risolvere questo problema;
 - **Solaio a terra** (causa del 15% delle perdite di calore): indicazioni sui possibili materiali isolanti utilizzabili e sulle modalità di installazione;
 - **Pareti** (causa del 35% delle perdite di calore): descrizione delle principali tipologie di muri storici e del loro comportamento termico;
 - **Copertura** (causa del 25% delle perdite di calore): indicazioni sui possibili materiali isolanti utilizzabili e sulle modalità di installazione;
 - **Aree comuni** (vani scala, distribuzione, ecc.): aree molto difficili da isolare perché richiedono il parere favorevole di tutti i proprietari, ma sono causa del cattivo comportamento energetico dell'intero fabbricato;
 - **Riscaldamento e uso di energia** (3/4 dell'energia usata in casa): caratteristiche dei sistemi di
-

architettoniche, sia in interno sia in esterno;

- *Building warrants*, richiesto per tutti gli interventi come verifica della sicurezza in uso dell'edificio;

In Inghilterra e in Galles i gradi di vincolo sono i seguenti:

Grado I: edifici con valore nazionale speciale;

Grado II*: edifici particolarmente importanti (* star rating);

Grado II: edifici di interesse speciale con autorizzazione a prendere ogni impegno per la conservazione.

Scozia e Irlanda del Nord usano la stessa classificazione ma contraddistinta dalle lettere A, B e C.

riscaldamento antichi poco efficienti. La trattazione di impianti innovativi è rimandata al secondo progetto (*Renewable Heritage*);

- **Illuminazione** (40% del consumo di energia domestica): generalità sulle principali fonti di illuminazione a basso consumo e loro integrazione negli edifici storici.

C) Quali lezioni si possono imparare dall'esperienza?

Questa ultima sezione riguarda l'applicazione di alcune strategie descritte ad un caso studio, il Lauriston Place (Edinburgh), edificio del 1820. Il progetto nasce dall'esigenza di fermare o diminuire il fenomeno del *fuel poverty*⁹ che, in particolare, colpisce le aree storiche di Edimburgo.

Soluzioni applicate:

- in alcuni appartamenti sostituzione dei vetri originali singoli con nuovi doppi vetri, in altri eliminazione dei soli ponti termici dovuti ai telai lignei a scarsa tenuta;
- installazione di scuri interni per aumentare l'isolamento termico e acustico delle finestre;
- isolamento del pavimento (*slime-line system*);
- isolamento del sottotetto;
- installazione di *smart-monitors*.

Principali risultati raggiunti dal progetto pilota:

- costi energetici annui per ogni appartamento ridotti di £175 (e in alcuni casi fino a £400);
- emissioni di CO₂ annue per ogni appartamento ridotte di 1 tonnellata (e in alcuni casi fino a 2.4);
- consumo di energia annuo ridotto fino a 5000 kWha (e in alcuni casi fino a 12000 kWha);
- National Home Energy Rating (NHER) cresciuta fino a 8.9.

RENEWABLE HERITAGE (A guide to microgeneration in traditional and historic homes)

Anche questa seconda guida si articola in tre parti (corrispondenti a quelle del primo capitolo della ricerca – Energy Heritage), basate sulla volontà di rispondere a tre rispettive domande.

A) Quali effetti produce l'installazione di impianti efficienti negli edifici storici?

La prima parte sottolinea le caratteristiche degli edifici storici in termini di efficienza energetica e le opportunità date dall'uso di fonti rinnovabili per aumentare la sostenibilità di questi edifici.

Le principali fonti di energia rinnovabile sono:

⁹ *Fuel Poverty* è un'espressione usata in Gran Bretagna, Irlanda e Nuova Zelanda per indicare quei proprietari che guadagnano meno di quanto spendono per la gestione della propria abitazione. Per questo non sono in grado di mantenere riscaldata la casa. Qualche volta il termine è considerato dispregiativo, per cui alcuni specialisti parlano dell'inverso: *affordable warmth*. Il fenomeno è causato da tre fattori principali (spesso combinati):

1. cattiva efficienza energetica degli edifici;
2. bassi guadagni dei proprietari;
3. alto costo del combustibile.

-
- solare termico;
 - fotovoltaico;
 - biomasse;
 - pompa di calore;
 - microeolico;
 - microidroelettrico.

B) Come possono essere installati gli impianti efficienti negli edifici storici?

Questa seconda parte è strutturata come una guida per la selezione e l'integrazione degli impianti innovativi negli edifici storici.

La prima operazione, prima di progettare e dimensionare il nuovo impianto, è assicurarsi che l'edificio abbia un buon comportamento energetico. Infatti, questo garantisce una minore richiesta di energia e una conseguente minore dimensione degli impianti necessari a produrla e emetterla negli ambienti. È fondamentale dimensionare accuratamente gli impianti per farli funzionare senza sprechi.

La guida presenta una rassegna delle principali tecnologie, del loro funzionamento tipico e delle strategie di integrazione architettonica.

C) Quali lezioni si possono imparare dall'esperienza?

Applicazione di alcune strategie descritte ad un caso studio Lauriston Place (Edinburgh).

Il progetto è diviso essenzialmente in due fasi:

Stage 1 (2008): installazione di un impianto solare termico per nove appartamenti che soddisfa metà del fabbisogno di acqua calda;

Stage 2 (2009): installazione di un impianto solare termico su altri due corpi scala dell'edificio, che soddisfa metà del fabbisogno di acqua calda.

SCHEDA 4**Regno Unito (UK)****Energy Efficiency Historic Homes – Case studies¹⁰**

Questo progetto è stato elaborato a partire dal 2005 per definire delle linee guida indirizzate in particolare ai proprietari delle centinaia di migliaia di edifici storici presenti nel Regno Unito, che abbiano dei vincoli o si trovino in aree protette. La guida si articola in sei casi studio che servono da esemplificazione degli indirizzi proposti. I sei edifici oggetto di riqualificazione energetica sono stati costruiti tutti tra il XVI e il XIX secolo.

Seppur non sia possibile delineare delle regole generali dettagliate per tutti gli interventi ci sono alcune indicazioni importanti che portano alla definizione delle principali operazioni di intervento.

Il primo aspetto riguarda la buona conoscenza del valore storico dell'edificio per un approccio conoscitivo dei materiali e delle strutture del fabbricato. Solo successivamente a questa fase è possibile fare una valutazione del fabbisogno per il riscaldamento e per la ventilazione dell'edificio. In generale è importante progettare, dove possibile, interventi reversibili nel futuro. Una descrizione più dettagliata dei casi studio e delle soluzioni proposte è riportata in appendice B.

SCHEDA 5**Programma Intelligent Energy****SECHURBA****Sustainable energy communities in historic urban areas¹¹**

Con il progetto SECHURBA vengono analizzati i benefici e le possibilità di ottenere risparmi energetici anche dal patrimonio costruito. Il consorzio del progetto lavora sugli edifici e i centri storici scelti come casi di studio e coinvolge architetti, urbanisti, politici, ricercatori, impiantisti e conservatori. L'obiettivo è

¹⁰ Progetto presentato dalla Energy Saving Trust (UK), un'impresa sociale che ha lo scopo di dare indirizzi per la riduzione delle emissioni di carbonio, un uso più sostenibile della risorsa acqua e per aiutare le persone a spendere meno per il consumo di energia.

www.energysavingtrust.org.uk.

¹¹ SECHURBA (Sustainable energy communities in historic urban areas), SECHURBA coinvolge 7 stati europei (in ordine alfabetico): Bulgaria, Danimarca, Grecia, Italia, Spagna, Regno Unito e Ungheria. Progetto in corso.

Grant agreement no. IEE/07/695/S12.499394.

WPA4: Sustainable Energy Buildings and Communities – Case studies.

Le attività del progetto sono guidate da 13 istituzioni. www.sechurba.eu.

dimostrare che è possibile integrare ed inserire in modo compatibile le tecnologie rinnovabili e metodi per l'efficienza energetica anche negli edifici storici. Il patrimonio costruito può diventare così uno strumento, e non un ostacolo, per ridurre l'emissione di CO₂ e per un uso efficiente dell'energia.

SECHURBA si rivolge alle comunità locali, valutando gli ostacoli e le opportunità, per sviluppare tecnologie basate su *best practice*, utilizzare strumenti innovativi e mettere a frutto le "Strategie comunitarie per i Cambiamenti Climatici". Ai migliori esempi di *best practice* fra i casi studio verrà assegnato il premio "*Historical Excellence*", così che possano essere sviluppati e replicati in altri luoghi.

L'obiettivo principale del progetto è rendere noto agli attori chiave nei processi decisionali - politici, amministratori, pianificatori, ma anche progettisti e conservatori - le opportunità e le potenzialità offerte dagli interventi energeticamente sostenibili applicati nelle aree urbane storiche, mostrando i risultati dei casi studio (comunità e centri storici e monumenti isolati) in modo da favorire lo sviluppo di queste tecnologie nelle future politiche energetiche e nei programmi locali di sviluppo.

Pertanto gli obiettivi specifici si prefiggono di identificare tutti i parametri sociali, legislativi, economici, energetici ed ambientali nei contesti locali, gli ostacoli e le barriere, esaminando i diversi casi studio nei paesi partecipanti e nell'EU e trovare possibili misure di sviluppo sostenibile che siano finanziariamente e tecnicamente appropriate per risparmiare energia e ridurre emissioni di CO₂, al di là delle richieste legislative europee.

Il progetto intende fornire indicazioni per l'utilizzo di RUE e RES¹² in aree urbane storiche, realizzando uno strumento applicativo innovativo per la verifica della fattibilità e la compatibilità di nuovi sistemi per il risparmio energetico in edifici antichi e centri storici, utilizzabile dagli operatori del settore.

I casi studio sono stati selezionati tra edifici storici presenti in più paesi europei, tra quelli che partecipano come *partner* alla ricerca. In questo modo, le soluzioni indagate sono testate su edifici con caratteristiche e contesti geografici differenti.

Uno dei prodotti principali della ricerca è la redazione di una guida per l'intervento di riqualificazione energetica su edifici storici chiamata *Progetto Sechurba. Una guida per la sostenibilità energetica in edifici e centri storici. Dalla cultura e dalla storia allo sviluppo sostenibile*.

È stato inoltre sviluppato uno strumento informatico, di aiuto nella fase decisionale della scelta di soluzioni e tecnologie da applicare ad edifici antichi e nella pianificazione di interventi in aree e centri storici. Sono stati esaminati meccanismi e incentivi finanziari e, in collaborazione con le comunità locali, sono state sviluppate strategie sui cambiamenti climatici nei centri storici per la riduzione delle emissioni di carbonio da adottare dalle autorità locali.

¹² RUE – Uso razionale delle energie (Rational Use of Energy), RES – Energie rinnovabili (Renewable Energy Systems).

L'Istituto Tecnologie Applicate ai Beni Culturali (ITABC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (Italia) ha sviluppato un modello di analisi e valutazione multicriteria al fine di dare supporto a progettisti, tecnici, amministratori e a tutti gli attori competenti nella implementazione di un progetto integrato finalizzato al recupero energetico negli edifici storici.

Il modello proposto si basa, in prima istanza, sulla definizione e valutazione di RES e RUE secondo tre livelli principali di azione:

1) identificando le alternative di risparmio energetico, ottenute considerando le caratteristiche fisiche ed ambientali dell'edificio;

2) tramite l'implementazione di una metodologia di analisi multicriteria (MCA) per il confronto delle alternative di intervento secondo criteri relativi all'impatto visivo, alla rispondenza alle caratteristiche fisiche ed alla importanza storica dell'edificio, alla efficienza energetica, alle risorse finanziarie ed economiche disponibili;

3) tramite l'uso di un *panel* di indicatori appositamente selezionati.

L'impostazione metodologica dello strumento permette al *team* di progettazione di valutare in maniera integrata tutte le componenti edilizie nonché i parametri tipologici e funzionali del complesso architettonico al fine di identificare le migliori alternative per risparmiare energia e al contempo, rispettare i caratteri storici, tipologici, morfologici dell'edificio (o del complesso di edifici) e del suo contesto ambientale.

I presupposti su cui è basata questa metodologia sono fondati, essenzialmente, sui seguenti principi chiave:

- le modifiche effettuate dovranno essere facilmente reversibili senza alcun danno per l'esistente;
- opportuna attenzione dovrà essere data ai nuovi materiali ed alle tecnologie innovative di risparmio energetico;

- gli interventi non devono in alcun modo alterare il carattere storico e morfo-tipologico dell'edificio o del complesso di edifici.

Tali esigenze hanno portato ad individuare una procedura capace di consentire il confronto integrato e la valutazione di tutti i parametri in gioco. In tale ottica, è stato sviluppato il metodo di analisi multicriteria basato sul metodo AHP (Analytic Hierarchy Process¹³), integrato all'approccio *expert based* (ovvero, con l'uso di pareri di esperti) fondato inoltre su una metodologia multidisciplinare.

Tale impostazione ha portato alla individuazione di un complesso processo di valutazione integrata

¹³ Il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process) è stato sviluppato nei primi anni 1970 da Thomas L. Saaty (Pennsylvania University). Il metodo offre gli strumenti metodologici per strutturare il problema decisionale, i criteri di valutazione / obiettivi e le alternative di progetto, e costituisce un efficace strumento di valutazione a supporto delle decisioni).

articolato sostanzialmente in 4 fasi:

1. definizione dell'obiettivo principale e dei criteri (e relativi sotto-criteri) di valutazione, al fine di valutare la compatibilità di interventi di recupero energetico nell'edilizia storica;
2. costruzione di un modello di analisi e valutazione dell'efficienza energetica delle soluzioni individuate;
3. identificazione di strategie di risparmio energetico;
4. costruzione della gerarchia AHP, definizione del processo di valutazione, identificazione di una gerarchia finale – secondo gli obiettivi definiti in precedenza – delle differenti soluzioni identificate.

Il progetto SECHURBA pone in evidenza che gli edifici e i centri storici, se ben conservati e attentamente adattati alle esigenze della società contemporanea, possono svolgere un ruolo importante nell'abbattimento delle emissioni di carbonio, anche se, per raggiungere questi risultati su ampia scala, ci sono ancora alcune questioni da risolvere. Sono necessari, però, ancora maggiori sforzi affinché le istituzioni legislative europee e nazionali, possano estendere la normativa anche al patrimonio architettonico, con effetti favorevoli verso l'innalzamento dei livelli di prestazioni sostenibili. Gli studi pilota attualmente sviluppati in Europa sono frammentari e insufficienti e si rende quindi necessario il lancio di progetti dimostrativi in questo settore.

Servono anche iniziative legislative e politiche, con l'appoggio delle istituzioni locali, ricerche e studi sistematici, progetti di controllo e verifica, campagne di educazione sociale e scambi delle conoscenze e delle informazioni.

6.2. Ricerche – valutazione dello stato di fatto

Di seguito sono presentate le principali ricerche elaborate nel campo della riqualificazione energetica del patrimonio costruito storico, che abbiano, come obiettivo principale, l'analisi degli strumenti di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici allo stato di fatto.

SCHEDA 6

Regno Unito (UK)

*Energy modelling analysis of a traditionally built Scottish tenement flat*¹⁴

Il progetto prevede di testare quattro diverse metodologie di modellazione energetica di un edificio antico. Lo studio è stato promosso per dare un contributo allo sviluppo di *software* dedicati alla modellazione di edifici antichi. La ricerca, infatti, nasce come risposta ad un'esigenza emersa da *Historic Scotland* di rendere più precisi e accurati i programmi di modellazione energetica usati attualmente, in riferimento ad edifici tradizionali.

La ricerca si articola in diverse fasi:

1. Indagine tecnica del caso studio: un edificio tradizionale del centro di Edimburgo;
2. Modellazione energetica del caso studio con gli strumenti ad oggi più diffusi nel mondo anglosassone:
 - *National Home Energy Rating (NHER)*;
 - *Standard Assessment Procedure (SAP)*;
 - *Reduced data Standard Assessment Procedure (RdSAP)*, dal quale viene generato l'*Energy Performance Certificate (EPC)*.
3. Analisi dei risultati.

Il caso studio è un edificio costruito negli anni '20 dell'800 con orientamento Nord-Sud (soggiorno a Sud), murature non isolate in arenaria di 600 mm di spessore, finestre con vetro singolo e telaio a scarsa tenuta. Esso presenta grandi superfici, finestre molto estese e altezze interpiano molto maggiori di quelle degli edifici di recente costruzione.

In generale le metodologie di modellazione hanno richiesto i seguenti dati:

- caratteristiche dell'edificio (forma, età, contesto di inserimento);
 - dimensioni;
-

¹⁴ Barnham B., Heath N. (sustainable Features), Pearson G. (Technical Energy Services), *Energy modelling analysis of a traditionally built Scottish tenement flat*, Changeworks for Historic Scotland, Ottobre 2008.

-
- caratteristiche costruttive;
 - dotazione impiantistica.

In alcuni casi è richiesto qualche dettaglio maggiore in riferimento al sistema di ventilazione meccanica.

I metodi analizzati usano tutti uno *Standard heating regime*, pertanto si riferiscono al periodo di riscaldamento che corrisponde a 9 ore per la settimana (2 ore la mattina e 7 la sera) e 16 ore per il weekend, considerando la temperatura interna fissata a 21 °C per il soggiorno e 18°C per il resto della casa. Il numero di occupanti è fissato teoricamente e in funzione delle dimensioni dell'edificio.

Per l'analisi sono stati usati tre software¹⁵:

- NHER Autoevaluation v. 4.1 (per due differenti livelli di analisi);
- NHER Surveyor v. 4.1 (per due differenti livelli di analisi);
- NHER Evaluator v. 4.1.

Le analisi mostrano risultati tutti diversi, dipendenti dalla quantità e dal dettaglio delle informazioni fornite ai *software*.

Più informazioni vengono fornite al *software*, più il *rating* energetico cresce (varia da 6.1 a 7.5). Il *range* di dati varia da programma a programma, in maniera sensibile. Questo rende difficile la valutazione della reale accuratezza del metodo di modellazione utilizzato.

L'analisi RdSAP sottostima la *performance* energetica dell'edificio, in particolare in riferimento ai valori di trasmittanza.

La varietà di risultati dipende pertanto dal fatto che i *software* permettono di selezionare soltanto la voce *edificio costruito prima del 1900 (o 1919)*, ma questa scelta è troppo generica perché si riferisce ad una varietà molto vasta di tipologie edilizie, soluzioni costruttive e materiali. Inoltre, alcuni software assumono dimensioni dell'edificio non corrette perché assimilano le caratteristiche a quelle degli edifici moderni senza considerare le maggiori dimensioni degli ambienti degli edifici antichi.

Il risultato di questa analisi è che è necessario continuare la ricerca per sviluppare modelli di simulazione specifici per gli edifici tradizionali Scozzesi.

¹⁵ I programmi usano tutti il sistema NHER (National Home Energy Rating, la classificazione energetica basata sui costi annuali a metro quadro per consumo di energia e emissioni di CO₂), il SAP 2001 (Standard Assessment Procedure) e il BREDEM 12 (Building Research Establishment Domestic Energy Model).

SCHEDA 7
Regno Unito (UK) - Scozia
U-Values and traditional buildings.
In situ measurement and their comparisons to calculated values¹⁶.

La ricerca si basa sull'ipotesi che i programmi per il calcolo della trasmittanza termica sovrastimino tale valore per gli edifici storici. Infatti, l'involucro storico tende ad avere una *performance* energetica migliore rispetto a quella che si calcola analiticamente. La ricerca suggerisce un rilievo *in situ* della trasmittanza termica dell'involucro come strumento ottimale per descrivere il comportamento energetico degli edifici più antichi.

Lo studio, pertanto, vuole analizzare gli strumenti *software* generalmente usati per il calcolo della trasmittanza di involucri nuovi o di recente costruzione, nel caso vengano usati su edifici storici. La conoscenza del reale valore di trasmittanza è fondamentale per stimare il comportamento energetico dell'intero edificio.

Il rilievo *in situ* è stato condotto su 57 chiusure verticali, 9 chiusure orizzontali e 1 inferiore, su 15 edifici diversi e durante tre stagioni (Novembre 2007 - Marzo 2010). Per le misure sono state usate piastre flussimetriche montate sulla faccia interna ed esterna della componente tecnologica analizzata e sonde, per rilevare le temperature interne ed esterne.

Gli edifici rilevati sono tutti costruiti prima del 1919 con tecniche costruttive tradizionali.

Le misure sono state effettuate su involucri intatti con finitura esterna di calce e finitura interna *plaster on lath*¹⁷. Per completare il confronto sono stati rilevati anche componenti edilizi già sottoposti a operazioni di riqualificazione, che hanno previsto l'aggiunta di nuovi strati isolanti. Sono state volutamente evitate soluzioni invasive per conoscere tutti i reali strati dei componenti analizzati, pertanto in alcuni casi non è possibile ricostruire la composizione di materiali rilevati, ma si ha un dato sommativo.

Il confronto è stato condotto tra i valori di trasmittanza rilevati, quelli calcolati attraverso due software (*BuildDesk* e *BRE U-value calculator*¹⁸) e quelli indicati dalla *Chartered Institution of Building Services*

¹⁶ Ricerca della Historic Scotland-Conservation Group (www.historic-scotland.gov.uk). Dr. Paul Baker (Glasgow Caledonian University), Gennaio 2011 e Dr. Caroline Rye, The Society for the Protection of Ancient Buildings (SPAB).

¹⁷ Il sistema *plaster on lath* è un metodo per costruire le finiture superficiali interne dei muri nei paesi anglosassoni prima del 1950, quando viene sostituita dall'avvento del cartongesso. Il sistema prevede di utilizzare un rivestimento di assicelle di legno disposte orizzontalmente e tenute insieme da uno strato interposto di calce.

¹⁸ BuildDesk software by BuildDesk Ltd., Pencoed, Bridgend, CF35 6NY.
BRE U-value calculator software by Building Research Establishment Ltd., Bucknalls Lane, Garston, Watford WD25 9XX.

Engineers¹⁹ e la Energy Saving Trust (si rimanda alla nota 10).

Particolare attenzione è stata riservata al contributo dato dalla proporzione di calce e pietra dei muri antichi di cui generalmente non si tiene conto nei software di analisi. Tali strumenti, infatti, nella maggior parte dei casi, considerano il muro omogeneo per tutto lo spessore.

I muri storici scozzesi sono generalmente solidi involucri di grossi spessori. Per lo più sono in muratura, realizzati con pietra finita con intonaco di calce o terra. La loro composizione, tutt'altro che omogenea, spesso è composta da strati diversi: uno esterno e uno interno fatti con conci di pietra più grossi e uno strato centrale composto da pietre più piccole mescolate alla calce (muro a sacco).

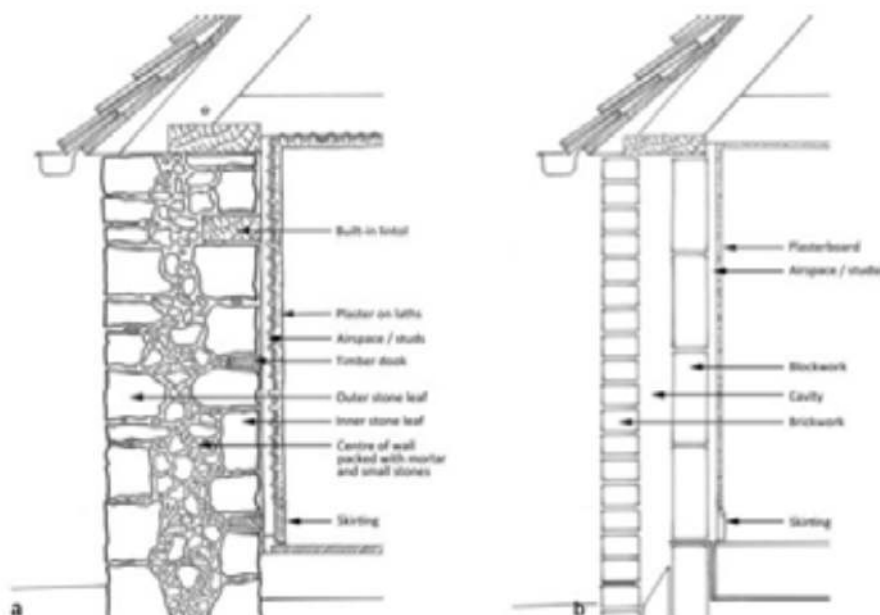


Figura 6.2. Confronto tra (a) un muro tradizionale e (b) uno di nuova costruzione. In a) la disomogeneità dei vari strati è evidente, mentre in b) sono ben definiti tre diversi strati (di cui uno è una camera d'aria)²⁰.

Alcuni degli edifici analizzati invece presentano finitura in terra cruda e fango.

In generale la trattazione ha interessato quattro tipi di finitura:

- intonaco;

¹⁹ Anderson B., 2006. *Thermal properties of building structures*, in Chartered Institution of Building services Engineers, 2006. CIBSE guide A: environmental design. 7th ed. London: CIBSE. Ch3.

²⁰ Da: P. Baker, *U-Values and traditional buildings. In situ measurement and their comparisons to calculated values*, in *Technical Paper 10*, Glasgow Caledonian University, Gennaio 2011, pagina V.

- plaster on lath;
- cartongesso;
- assi di legno.

La figura 6.3 indica le principali misure effettuate per quanto riguarda le chiusure verticali.

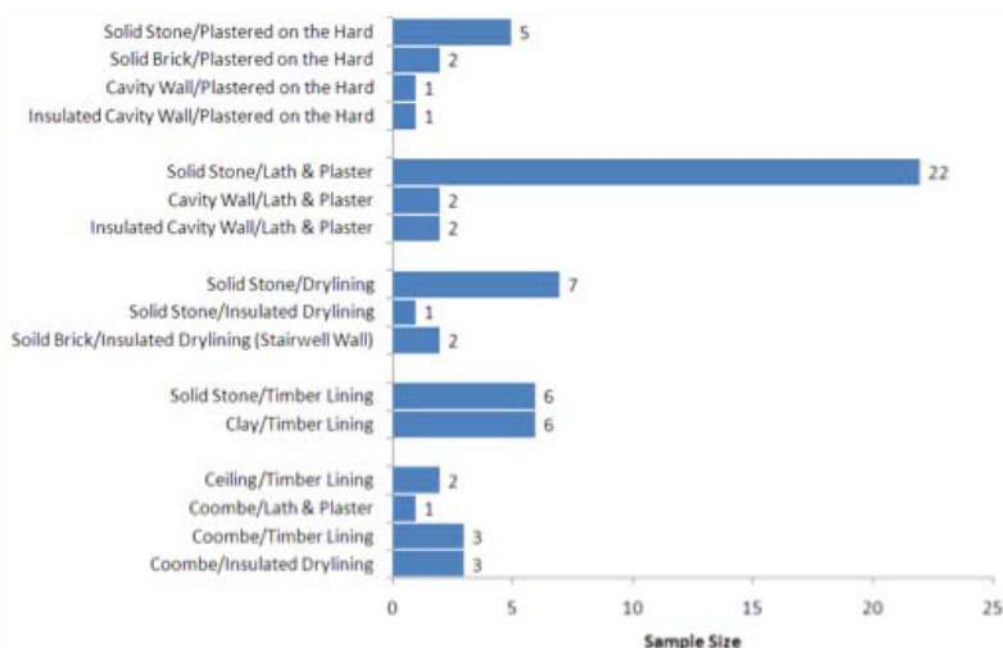


Figura 6.3 . Distribuzione delle principali misurazioni per componente tecnologica e finitura superficiale²¹.

1. INFLUENZA DELLO SPESSORE DELLA MURATURA

Nei muri di pietra lo spessore dell'involucro influenza positivamente il valore di trasmittanza: un muro di 600 mm ha una trasmittanza che varia da 0.8 a 1.6 W/m²K, mentre uno di 300 mm di spessore ha U=2.3 W/m²K.

La stessa conclusione si può trarre per muri con finitura esterna in legno: un muro di 300 mm di spessore presenta un valore di trasmittanza pari a 1.1-1.5 W/m²K mentre uno di 760-1200 mm ha una U=0.6-0.9 W/m²K;

2. INFLUENZA DELLA FINITURA

Il valore di trasmittanza di murature con finitura a intonaco è 1.6 W/m²K (muratura in pietra con spessore

²¹ *ivi*, pagina 8.

600 mm), mentre per componenti tecnologici con stesso materiale e spessore ma finitura in *plaster on lath* la $U = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e in cartongesso $U = 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Per le finiture interne, invece:

- Elementi finiti con *plaster on lath*: $1.1 \pm 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Elementi finiti con cartongesso: $0.9 \pm 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

La presenza di intercapedini d'aria negli elementi con finitura in cartongesso o *plaster on lath* o legno influenza positivamente il calcolo.

3. CONFRONTO DATI RILEVATI CON QUELLI CALCOLATI TRAMITE SOFTWARE

La *figura 6.4* riassume i principali risultati, indicando i dati di trasmittanza inferiore, simile o maggiore di quella calcolata.

Su 57 dati rilevati, 25 (44%) sono inferiori, 24 (42%) sono assimilabili a quelli calcolati e 8 (14%) sono più alti. In generale, gli elementi con intonaco o *plaster on lath* presentano i dati più simili a quelli simulati, mentre quelli con cartongesso e con finitura in legno quelli con dati più distanti dai valori calcolati.

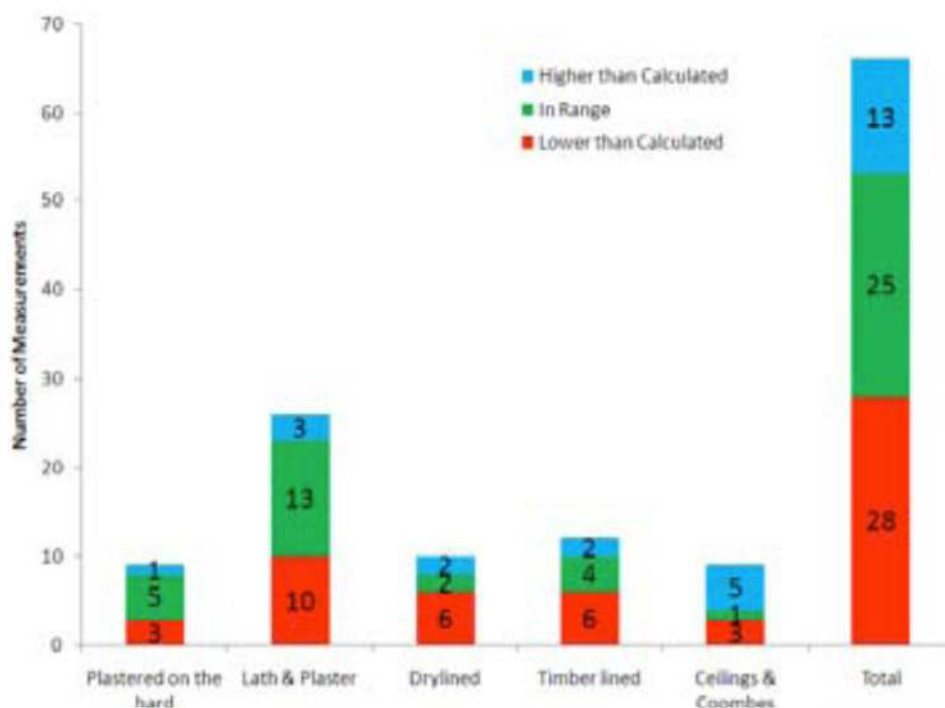


Figura 6.4. Confronto tra i dati rilevati e quelli simulati con il software in relazione alla categoria e al numero di misure prese²².

²² Ivi, pagina 25;

Se si considerano i muri in pietra e si prende il valore di U più alto che corrisponde al caso di muro omogeneo senza prendere in considerazione il rapporto tra pietra e calce, solo il 5% (2) delle misure prese sono simili al dato calcolato.

Per tutte questi aspetti il confronto tra i valori rilevati e quelli simulati mostra che la modellazione della trasmittanza dell'involucro di edifici antichi è alquanto incerta.

Per rendere la simulazione *software* più vicina alla realtà è necessario conoscere questi aspetti:

- spessore dei singoli strati;
- stato delle cavità interne (isolata, con aria, ventilata);
- proporzione tra pietra e malta all'interno del muro;
- proprietà termiche dei singoli materiali coinvolti nelle costruzioni tradizionali (pietra locale, mattone vecchio, muro in terra cruda o fango, intonaci tradizionali, ecc.).

4. CONFRONTO DATI RILEVATI CON QUELLI INDICATI DALLA NORMATIVA

Per murature tradizionali in pietra di 600 mm di spessore e finitura interna in *plaser on lath*:

- > EST (Energy Saving Trust): 1.7 W/m²K
- > CIBSE: 1.38 W/m²K
- > Dato rilevato: 1.1± 0.2 W/m²K

Per murature con cavità interna e mattoni:

- > EST (Energy Saving Trust): 1.7 W/m²K
- > CIBSE: 1.44 W/m²K
- > Dato rilevato: 1.3 W/m²K

I dati rilevati, in media, indicano un comportamento termico delle murature migliore di quello calcolato, il che indica che si deve procedere a isolare, nelle operazioni di riqualificazione, con grande cautela.

Nello stesso tempo lo studio mostra che i valori di trasmittanza possono variare molto sia da edificio a edificio, sia all'interno dello stesso edificio, pertanto è necessario prestare attenzione prima di esportare i risultati presentati al caso generale. Per avere la massima sicurezza è necessario fare indagini specifiche caso per caso, accompagnando i rilievi con piastre termoflussimetriche a indagini termografiche.

 SCHEDA 8

Paesi Scandinavi

 EEPOCH – Energy Efficiency and Preservation in Our Cultural Heritage²³

L'obiettivo principale del progetto è definire dei modelli di intervento per dare una risposta adeguata sia all'esigenza di conservazione sia alla necessità di miglioramento energetico del patrimonio storico, contribuendo ad aumentare la conoscenza relativa alle principali criticità in questo ambito.

Gli obiettivi dei primi due anni di ricerca sono:

- definire lo sviluppo di strumenti di calcolo e modellazione specifici e strumenti di comunicazione tra i professionisti attraverso l'uso di progetti pilota;
- definire il campo per future ricerche volte allo sviluppo del tema per implementare le competenze dei professionisti.

EEPOCH si sviluppa essenzialmente di due parti:

1. Analisi dei valori e delle caratteristiche storiche dell'edificio (valori architettonici, storici e sociali come autenticità, patina, continuità, valori simbolici, rarità, ecc.): i dati sono raccolti negli archivi, nei documenti e nelle fotografie per avere un quadro quanto più completo possibile del manufatto;

2. Analisi del comportamento energetico: la valutazione è svolta in quattro modi; attraverso una camera a infrarossi, attraverso simulazioni analitiche (sia manuali, sia *software*) del bilancio energetico e misurando gli attuali consumi energetici.

Il primo caso studio analizzato (Fattighuset, Drotting Kristina 2 a Halmstad, costruito tra il 1859 e il 1879) ha messo subito in evidenza la fondamentale necessità di conoscere i reali consumi dell'edificio allo stato di fatto come condizione necessaria per programmare il suo miglioramento energetico. Il comportamento può essere calcolato analiticamente ma il risultato molto spesso differisce da quello reale. La ragione è principalmente da imputare al calcolo dei ponti termici e della ventilazione che viene calcolata con un metodo studiato per nuove costruzioni e non per gli edifici antichi. Né le perdite di calore attraverso i ponti termici, né la compensazione positiva data da un comportamento termico buono dei grossi muri storici possono essere verificate con il metodo di calcolo. Per questa ragione sono state misurate le temperature interne di alcuni edifici campione. Successivamente, i valori reali di trasmittanza dei componenti e quelli calcolati usando i valori di conducibilità certificati per materiali nuovi sono stati confrontati per rimodulare e correggere i valori calcolati.

²³ Swedish energy agencies' research programme for energy efficiency in historic valuable building. EEPOCH (Energy Efficiency and Preservation in our Cultural Heritage in Halland) è uno dei numerosi progetti del programma Save & Preserve finanziato da Swedish Energy Agency e, nel caso specifico, anche da Regional Companies Halland. Il progetto è partito nel 2009;

Il valore di trasmittanza per le murature in mattoni è stato calcolato utilizzando i valori di temperatura superficiale del muro e la temperatura ambiente esterna e interna. Per gli altri dati sono stati utilizzati i valori di conducibilità dei materiali correnti (presi da otto diversi manuali). Tutti i dati sono stati infine corretti dopo i rilievi e le analisi dei materiali reali, mentre per i vetri è stato direttamente adoperato il valore di trasmittanza indicato dalla normativa.

In relazione alla gestione e alla conservazione del patrimonio storico ci sono altre ricerche europee finanziate dal Settimo programma quadro che affrontano il tema della ricerca di dottorato qui presentata in maniera marginale o più generale. Per questa ragione si fa solo un riferimento ad esse come possibile altro ambito di approfondimento per il futuro.

Molte di esse costituiscono un unico *cluster* di ricerca. Le principali sono:

- Euchic (Cultural Heritage Identity Card)²⁴;
- Climate for Culture²⁵;
- Smoohs (Smart Monitoring of Historic Structures)²⁶;
- Perpetuate (Performance – based Approach to Earthquake Protection of Cultural Heritage in European and Mediterranean Countries)²⁷.

²⁴ Per approfondimento si veda: <http://eu-chic.eu/index.php>

²⁵ Per approfondimento si veda: <http://www.climateforculture.eu/>

²⁶ Per approfondimento si veda: <http://www.smoohs.eu/tiki-index.php>

²⁷ Per approfondimento si veda: <http://www.perpetuate.eu/>

6.3. Valutazioni critiche

Le ricerche internazionali documentate rappresentano alcuni tra i programmi più interessanti per quanto riguarda la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio storico, fuori dall'Italia²⁸. Nonostante siano in numero ridotto rispetto ai progetti italiani sugli stessi argomenti, la diffusione di tali studi dimostra quanto l'argomento sia di interesse anche laddove il patrimonio storico sia meno numeroso e antico di quello italiano. Come si diceva in apertura di capitolo, ai fini della trattazione, la conoscenza delle ricerche internazionali, non ha lo scopo di mettere in luce i singoli risultati in termini di efficienza energetica degli edifici o analisi dei dati rilevati sui diversi casi studio, perché gli edifici analizzati presentano, nella maggior parte dei casi, caratteristiche architettoniche e costruttive diverse da quelle italiane. Ciò che è di maggior interesse, invece, è studiare l'approccio degli enti di ricerca stranieri al problema, perché l'obiettivo finale del lavoro non è definire il comportamento energetico di una particolare tipologia edilizia, bensì analizzare il metodo su cui si basano tali valutazioni. L'approccio proposto dalle ricerche appena presentate è comune in molti paesi: si tratta di un *approccio olistico*, che mira a individuare delle strategie di intervento energetico a partire dalla definizione quanto più corretta del comportamento energetico dell'edificio allo stato di fatto (linee guida per l'intervento).

L'obiettivo comune è, infatti, quello di creare una guida operativa per una corretta conservazione del patrimonio storico, che sia direttamente indirizzata ai proprietari di questi immobili (siano questi privati o istituzioni pubbliche). In particolare si sintetizzano di seguito gli aspetti più ricorrenti:

- gli interventi devono essere quanto più reversibili;
- devono essere preferiti materiali tradizionali a quelli nuovi;
- è necessario valutare e eliminare le infiltrazioni d'aria;
- è necessario considerare, quale aspetto positivo e fondamentale dell'edificio storico, la componente di ventilazione naturale nell'intervento;
- è necessario valutare attentamente la sostituzione delle finestre e delle porte originali (valutazione beneficio energetico/conservazione).

L'aspetto più interessante, comune a tutti gli studi, è quello di considerare la fase di *audit* energetico, quale momento fondamentale nel processo di riqualificazione energetica. In tutte le ricerche si trovano valutazioni circa i reali consumi dell'edificio confrontati a quelli simulati attraverso i *software*, oppure viene sottolineato come un'indagine termica *in situ* possa fornire molte più informazioni aggiuntive rispetto alla sola ricostruzione storica delle caratteristiche costruttive e morfologiche dell'edificio in esame.

In particolare, la ricerca scozzese *U-Values and traditional buildings. In situ measurement and their*

²⁸ La rassegna non ha la pretesa di essere esaustiva ma intende fornire un quadro generale dello stato dell'arte straniero in riferimento alla riqualificazione energetica del patrimonio storico.

comparisons to calculated values e quella scandinava EEPOCH, mostrano interessanti risultati in riferimento a rilievi energetici sperimentali. Questi dati dimostrano la reale difficoltà di stimare correttamente il comportamento energetico degli edifici storici, che presentano soluzioni tecnologiche non facilmente riconducibili a modelli standardizzati o di cui si conoscono, tramite normative tecniche, dati energetici certi.

Pertanto, anche dallo stato della ricerca straniero, come da quello italiano, emerge la necessità di esplorare il tema sotto nuovi punti di vista, sia per quanto riguarda una sensibilizzazione delle autorità che spinga alla redazione di normative specifiche per l'edilizia storica, sia per quanto riguarda il tema della valutazione energetica dello stato di fatto, in relazione agli strumenti di calcolo oggi utilizzati.

Valutazione del metodo di calcolo secondo normativa e indicazioni per l'adeguamento al caso dell'edilizia storica

Lo studio dello stato dell'arte in materia di riqualificazione energetica e ambientale degli edifici storici ha messo in luce l'importanza della conoscenza del fabbricato allo stato di fatto, come primo passo del processo di riqualificazione. Come si è dimostrato nei capitoli precedenti, sono ancora poche le ricerche che si sono occupate dell'argomento in maniera compiuta. È sempre più diffusa, però, la convinzione che, nel processo valutativo, ci siano reali difficoltà, legate all'applicazione degli strumenti di indagine agli edifici storici. Queste complicazioni sono tutte legate alla difficoltà di descrivere, dettagliatamente come richiede il metodo di indagine, le caratteristiche tecnologiche e materiche dell'edificio antico. Questa parte della tesi, pertanto, si occupa di analizzare i diversi metodi di indagine per la definizione del comportamento energetico degli edifici, applicati al patrimonio storico, per evidenziare tali criticità. L'analisi degli strumenti può rappresentare il primo passo verso la definizione di metodi di indagine specifici per gli edifici storici.

Capitolo 7. Metodi di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici

Con il presente capitolo si descrivono i metodi di calcolo riconosciuti dalla normativa nazionale come strumenti per la definizione del comportamento energetico degli edifici. Tali strumenti sono stati testati su 14 casi studio appartenenti a 5 diversi edifici, con l'obiettivo di mettere a confronto criticamente i risultati ottenuti con i diversi strumenti e proporre gli aggiustamenti necessari a rendere tali strumenti adeguati all'utilizzo su edifici storici.

7.1. Descrizione dei metodi di calcolo riconosciuti

In base alle indicazioni contenute nel DM 26 giugno 2009¹ ci sono diverse metodologie di riferimento per la determinazione della prestazione energetica degli edifici, differenti per utilizzo e complessità:

1. Metodo di calcolo da progetto (*Design rating*):

prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso del progetto energetico dell'edificio, come costruito, e dei sistemi impiantistici a servizio dell'edificio, come realizzati. Questo metodo, valido a livello legislativo nazionale per la certificazione e la classificazione energetica di edifici di nuova costruzione e per quelli completamente ristrutturati, permette di ottenere un indice di prestazione energetica *ideale* (vincolato a scenari di esercizio e a condizioni climatiche mediamente stazionarie);

2. Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio o standard (*Asset rating*):

prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso ricavati da indagini svolte direttamente sull'edificio esistente. In questo caso le modalità di approccio possono essere:

a) mediante procedure di rilievo, anche strumentali, sull'edificio e/o sui dispositivi impiantistici, effettuate secondo le normative tecniche di riferimento, previste dagli organismi normativi nazionali, europei e internazionali, o, in mancanza di tali norme, dalla letteratura tecnico-scientifica;

b) per analogia costruttiva con altri edifici e sistemi impiantistici coevi, integrata da banche dati o abachi nazionali, regionali o locali;

c) sulla base dei dati climatici, tipologici, geometrici ed impiantistici;

3. Metodo adattato all'utenza (*Tailored rating*):

prevede la valutazione della prestazione energetica in relazione al tipo di utenza e di utilizzo dell'edificio.

¹ Linee guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici, Allegato A, articolo 3, comma 1, punto 4.

In *tabella 7.1* si riportano i diversi tipi di valutazione energetica di calcolo, così come sono definiti dalla normativa tecnica UNI TS 11300:2008.

TIPO DI VALUTAZIONE	DATI DI INGRESSO			SCOPO DELLA VALUTAZIONE
	USO	CLIMA	EDIFICIO	
Da Progetto (<i>Design rating</i>)	Standard	Standard	Progetto	Permesso di costruire, certificazione o qualificazione energetica del progetto
Da rilievo o Standard (<i>Asset rating</i>)	Standard	Standard	Reale	Certificazione o qualificazione energetica
Adattata all'utenza (<i>Tailored rating</i>)	In funzione dello scopo		Reale	Ottimizzazione, validazione, diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione energetica

Tabella 7.1. Tipi di valutazione classificati secondo la UNI TS 11300-1, a pagina 2

Tutti i metodi di calcolo previsti dalla normativa sono definiti da una specifica tecnica unica: la norma UNI TS 11300 parti 1,2,3 e 4 e successive integrazioni, che definisce le modalità di applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008. La normativa tecnica UNI TS 11300 costituisce, quindi, il corpo metodologico di calcolo e in essa sono indicate, oltre alle procedure di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, tutti i riferimenti normativi per le disposizioni di calcolo contenute in altre pubblicazioni². Tale insieme di normative tecniche costituisce lo strumento più completo, oggi a disposizione del progettista, per il calcolo delle prestazioni energetiche di un edificio nuovo o esistente. Lo strumento completo permette di compiere un *calcolo analitico* perché indica come calcolare analiticamente la prestazione energetica dell'edificio, considerando l'influenza di ogni singolo elemento e di ogni materiale sul dato globale. Se eseguito correttamente, il risultato che ne deriva è il frutto della caratterizzazione completa dell'edificio. Tale strumento viene definito *metodo di calcolo analitico standardizzato*.

² Si rimanda a pagina 3 della specifica tecnica UNI TS 11300-1 *Prestazioni energetiche degli edifici*, per l'elenco completo dei riferimenti normativi che costituiscono l'insieme degli strumenti oggi a disposizione del progettista per eseguire il calcolo.

La normativa prevede e richiede, indipendentemente dal metodo utilizzato, il calcolo in regime mediamente stazionario.

Il *calcolo in regime mediamente stazionario* si basa essenzialmente sull'approssimazione di alcuni fattori, tra cui i cosiddetti fenomeni transitori che, variando nel tempo, incidono in maniera rilevante sul comportamento energetico degli edifici. Alcuni di questi fenomeni sono di origine climatica (per esempio, variazione della temperatura esterna, dell'irraggiamento solare, dell'umidità relativa, ecc.), altri hanno origini di tipo antropico, come per esempio il comportamento dei singoli occupanti che influenza il funzionamento degli impianti domestici in maniera dinamica e caotica, e di conseguenza influenza le prestazioni energetiche degli edifici.

Un'alternativa a discrezione del progettista è rappresentata dal *calcolo in regime dinamico* che permette di tenere in considerazione i fenomeni transitori suddetti.

Tale studio richiede procedimenti matematici difficilmente risolvibili senza l'ausilio di specifici *software*. Il fatto di richiedere *software* dedicati di ausilio al calcolo, tempi di modellazione molto più lunghi e capacità non frequenti nei professionisti, fa prediligere, nella maggior parte dei casi, il calcolo in regime mediamente stazionario a quello in regime dinamico.

Il metodo di calcolo analitico vigente (elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano³) è molto accurato perché, conoscendo tutte i componenti dell'involucro edilizio e la conformazione dell'edificio, permette di ottenere un dato di prestazione energetica molto vicino a quello reale. Esso, però, è anche piuttosto articolato perché prevede numerosi calcoli e l'individuazione di una molteplicità di elementi costituenti l'edificio, che rendono il calcolo abbastanza lungo e complicato (immaginando di poter descrivere accuratamente, come prevede il metodo, tutte le parti costituenti l'edificio).

Per questa ragione, in seguito alla sua entrata in vigore, è stata creata una metodologia di calcolo *semplificata*, il cui uso è previsto dalle stesse norme tecniche UNI TS 11300, che permettesse un uso più facile da parte dei professionisti, da impiegarsi nella pratica quotidiana. La struttura del metodo semplificato è stata studiata e sviluppata secondo criteri di semplicità, chiarezza e intuitività. Infatti, tutti i dati qualitativi e quantitativi necessari possono essere introdotti sulla base della documentazione a

³ Il Comitato Termotecnico (CTI), ente federato all'UNI, ha lo scopo di svolgere attività normativa ed unificatrice nei vari settori della termotecnica. Il CTI si propone di fornire agli utenti gli strumenti normativi per lo sviluppo del settore termotecnico. Per attuare il proprio compito istituzionale, il CTI, in collegamento con l'UNI e con i corrispondenti enti di normazione esteri, provvede a elaborare progetti di norma e altri documenti (guide o raccomandazioni) interessanti il settore termotecnico, aggiornare e rivedere norme e documenti già esistenti (CTI e/o UNI-CTI) e curare la partecipazione ai lavori normativi internazionali del settore. www.cti2000.it.

disposizione del progettista e di un *audit* energetico minimo.

Le principali semplificazioni al metodo di calcolo analitico sono contenute, come si diceva, nelle specifiche tecniche (UNI TS 11300) e si traducono anche in strumenti di calcolo operativi supportati da programmi *software* (gratuiti o commerciali) con interfaccia *userfriendly*, in modo da semplificare ulteriormente la compilazione del *format* necessario al calcolo. I principali *software* oggi disponibili sono indicati dal CTI - Comitato Termotecnico Italiano - sul proprio sito internet⁴.

Lo stesso D.Lgs 311/06 afferma: *“l'utilizzo di altri metodi, procedure e specifiche tecniche sviluppati da organismi istituzionali nazionali, quali l'ENEA, le università o gli studi del CNR, è possibile, motivandone l'uso nella relazione tecnica di progetto [...], purché i risultati conseguiti risultino equivalenti o conservativi rispetto a quelli ottenibili con i metodi di calcolo precedentemente detti.”*⁵

Tali strumenti, assolutamente necessari per facilitare il lavoro quotidiano dei professionisti, racchiudono al proprio interno alcune approssimazioni, dovute necessariamente alle semplificazioni introdotte nei calcoli. In letteratura⁶ si trovano alcuni studi che hanno tentato di valutare queste semplificazioni, evidenziandone eventuali limiti se applicate all'edilizia esistente. I principali risultati sono il frutto del confronto fra i consumi reali dell'edificio e i risultati che si ottengono attraverso le simulazioni, fatte sia con il metodo analitico sia con i sistemi di calcolo semplificati. Il confronto mette in luce un divario fra i risultati, dato dalle approssimazioni contenute inevitabilmente nei metodi semplificati. Tale *gap*, però, è stato ritenuto accettabile, perché lo scostamento non è rilevante, per gli edifici di nuova costruzione o esistenti non storici.

Anche la normativa afferma, infatti, che: *“Gli strumenti di calcolo applicativi dei metodi di riferimento nazionali (software commerciali) devono garantire che i valori degli indici di prestazione energetica, calcolati attraverso il loro utilizzo, abbiano uno scostamento massimo di più o meno il 5% rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dei pertinenti riferimenti nazionali”.* (D.Lgs 311 del 2006)⁷

Nel *paragrafo 7.2* si riporta il risultato di una delle ricerche che hanno indagato questo ambito, che è stata

⁴ Si rimanda a: www.cti2000.it/index.php?controller=sezioni&action=show&subid=34.

⁵ D.Lgs 311/06, Allegato I, Articolo 11: Regime transitorio per la prestazione energetica degli edifici, comma 16.

⁶ Cfr: Tronchin L., Fabbri K., Round Robin A., *Test for buildings energy performance in Italy*. «Energy and Buildings». Volume 42, Issue 10, October 2010, Pages 1862-1877, Belpoliti V., *Riqualificazione energetica nell'edilizia sociale*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologie chimiche ed energetica, Università degli studi di Udine, Università degli studi di Ferrara e Acer (Azienda casa Emilia Romagna) di Reggio Emilia, 2011 e Hens H., Verbeeck G., Verdonck B., *Impact of energy efficiency measures on the CO2 emission in the residential sector, a large scale analysis*. «Energy and buildings», volume 33, issue 3. Febbraio 2001.

⁷ D.Lgs 311/06, Allegato I, Articolo 11: Regime transitorio per la prestazione energetica degli edifici, comma 16.

condotta all'interno del centro Architettura>Energia⁸.

7.2. Confronto tra i metodi di calcolo delle prestazioni energetiche nell'edilizia sociale

La ricerca che si riporta all'attenzione ha sperimentato le diverse metodologie di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, su diversi casi studio⁹. I risultati più interessanti, derivanti dalla sperimentazione su quattro dei casi studio analizzati, sono riportati nella *tabella 7.2*.

EDIFICIO	EP _{gi} – INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA						
	METODO STANDARDIZZATO kWh/m ² a	CONSUMI ENERGETICI REALI kWh/m ² a	SCOSTAMENTO DAL METODO DI CALCOLO STANDARDIZZATO %	DOCET KWh/m ² a	SCOSTAMENTO DAL METODO DI CALCOLO STANDARDIZZATO %	DINAMICO kWh/m ² a	SCOSTAMENTO DAL METODO DI CALCOLO STANDARDIZZATO %
Via Due Canali Reggio Emilia	310,7	166,5	- 46	365	17	224,7	- 32
Via Foscatò 22-28 Reggio Emilia	220,5	146,2	- 34	240,1	9	177,9	- 16
Via Melato 28-30 Reggio Emilia	315,9	-	-	369	17	220,9	- 31
Via Foro Boario Ferrara	364,6	-	-	419,5	15	278,8	- 42

Tabella 7.2. Matrice di paragone tra i risultati di prestazione energetica degli edifici ottenuti con diversi metodi di analisi e calcolo. I valori indicati con valore negativo indicano che lo scostamento dal metodo di calcolo standard UNI TS 11300 restituisce una prestazione energetica migliore (consumi inferiori). I valori positivi indicano invece che il dato è conservativo rispetto al metodo standardizzato (maggiori consumi energetici).

La tabella mostra i risultati di prestazione energetica degli edifici ottenuti con cinque diversi metodi di analisi o calcolo:

- metodo analitico standardizzato UNI TS 11300, parti 1 e 2;
- metodo di calcolo sulla base del rilievo dei consumi reali;
- *software* DOCET®¹⁰: analisi in regime mediamente stazionario, con metodo semplificato;

⁸ Il lavoro ha preso avvio con il percorso di dottorato in Tecnologie Chimiche ed Energetiche (XXIII ciclo) dell'arch. Vittorino Belpoliti (tutor prof. Giacomo Bizzarri), per poi proseguire come attività del Centro di ricerche Architettura>Energia. Il lavoro si intitola "Riqualificazione energetica dell'edilizia sociale".

⁹ Si tratta di edifici esistenti, appartenenti alla tipologia edilizia "residenza sociale", gestiti da Acer (azienda Casa Emilia Romagna) della provincia di Reggio Emilia.

¹⁰ Software di diagnosi e certificazione energetica degli edifici residenziali esistenti, con attestato di certificazione ottenuto dal CTI, elaborato da CNR ed ENEA. Dal 2010 è disponibile anche il software Docet Pro che permette la diagnosi, certificata, anche di edifici non residenziali nuovi ed esistenti.

www.docet.itc.cnr.it

- software *Energy Plus®* + *Design Builder®*¹¹: analisi in regime dinamico con valutazione dei soli fenomeni transitori climatici (esterni all'edificio);

Lo studio ha evidenziato che il sistema *Docet* dell'ENEA offre sempre un risultato conservativo rispetto a quello ottenibile con il calcolo standard UNI TS 11300. Gli altri metodi, invece, restituiscono un dato di Indice di Prestazione energetica globale (EP_{gl})¹² più basso rispetto al sistema *Docet* (dato confermato anche da altri studi¹³), ma più alti dello scenario reale, a testimonianza del fatto che la stessa metodologia UNI TS 11300 propone risultati di consumi energetici *ideali*, approssimando alcuni parametri di calcolo, come per esempio, l'assunzione del regime continuativo di funzionamento dell'impianto.

L'ultimo metodo di calcolo, atto a verificare dinamicamente sia l'effettiva incidenza dei fenomeni transitori climatici, sia il reale comportamento degli occupanti nell'utilizzo degli impianti domestici, presenta risultati interessanti. È quello che, nella maggioranza dei casi testati, più si avvicina al dato di EP_{gl} verificato sulla base dei consumi reali; ciò a testimonianza del fatto che il metodo di valutazione dinamica completa tende a simulare meglio il reale comportamento energetico dell'edificio.

Gli strumenti semplificati sono stati elaborati per il calcolo delle prestazioni energetiche di edifici nuovi o esistenti non storici e non per essere utilizzati specificatamente su edifici antichi. Per il calcolo della prestazione energetica di questa particolare tipologia edilizia è necessario prestare maggiore attenzione, perché una valutazione scorretta può pregiudicare la buona riuscita dell'intervento di riqualificazione. Se la letteratura ha provato a stimare le approssimazioni contenute in questi strumenti semplificati, ritenendole valide per gli edifici esistenti non storici, per gli edifici antichi è ancora necessario verificare se esse possano essere accettabili e in che termini è possibile applicare i metodi semplificati perché essi possano fornire il dato di prestazione ideale che ci si aspetta.

Per verificare la presenza di un *gap* tra i risultati ottenuti con i diversi metodi e quantificare tale scostamento, la ricerca ha sperimentato i diversi strumenti di calcolo su 14 casi studio (appartenenti a 5

¹¹ Il software *Energy Plus®* è distribuito gratuitamente dal Dipartimento di Energetica degli Stati Uniti ed è utilizzato con interfaccia *Design Builder®*, elaborato in Gran Bretagna, che basa il suo calcolo sul codice ASHRAE. L'uso di questo software permette simulazioni in regime dinamico. DOE U. S. Department of Energy. www.energy.gov www.designbuilder.co.uk.

¹² Si rimanda al *paragrafo 7.4* per una trattazione compiuta del calcolo di prestazione energetica di un edificio. In breve, con EP_{gl} si intende il "fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria" dell'edificio (UNI TS 11300 parte 2).

¹³ Tronchin L., Fabbri K., Round Robin A., *Test for buildings energy performance in Italy*. «Energy and Buildings». Volume 42, Issue 10, October 2010, Pagine 1862-1877.

edifici storici) che permettono, attraverso il confronto dei risultati ottenuti, di condurre una analisi critica dei metodi di calcolo.

Nei paragrafi successivi sono descritti i casi studio analizzati e i risultati delle simulazioni svolte.

7.3. Confronto tra i metodi di calcolo delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica

7.3.1. Simulazioni in regime mediamente stazionario dei casi studio

Come si è detto nel *paragrafo 1.3*, gli edifici monumentali, intesi come emergenze architettoniche, sono fabbricati antichi che si differenziano dal tessuto aggregativo di base costituente i centri storici, per caratteristiche tipologiche, morfologiche e di impiego dei materiali. Pertanto, i casi studio selezionati sono tutti edifici di questo tipo, perché possano essere rappresentativi di determinate caratteristiche tipiche dell'edilizia storica. In questo modo è stato possibile testare gli strumenti di calcolo in situazioni energetiche diverse da quelle usuali, tipicamente riscontrabili in edifici nuovi o di recente costruzione.

Tutti gli edifici selezionati appartengono alla stessa zona climatica E, perché sono dislocati tutti in Emilia Romagna e Veneto. Benché la posizione geografica influisca fortemente sulla prestazione energetica di un edificio, essa non cambia sia che l'edificio sia nuovo sia che si tratti di edilizia antica. La computazione, nel calcolo della prestazione energetica, dei gradi giorno relativi alla localizzazione del fabbricato viene fatta nello stesso modo, qualunque sia l'oggetto di studio. Pertanto, ai fini del presente lavoro, non interessa la provenienza geografica dei casi studio, perché non è oggetto di analisi il modo in cui il corpo metodologico di calcolo preveda stimarla, ma lo si assume come valido a priori.

Per ciascuno dei casi studio è fornita una:

- *scheda di presentazione*, che descrive le principali fasi di costruzione e sviluppo del fabbricato;
- *descrizione delle peculiarità architettoniche* per le quali è stato scelto;
- *scheda contenente il rilievo architettonico dell'edificio* e i suoi principali dati dimensionali;
- una *scheda tecnologica*, che riassume i principali pacchetti tecnologici che costituiscono l'involucro edilizio del fabbricato.

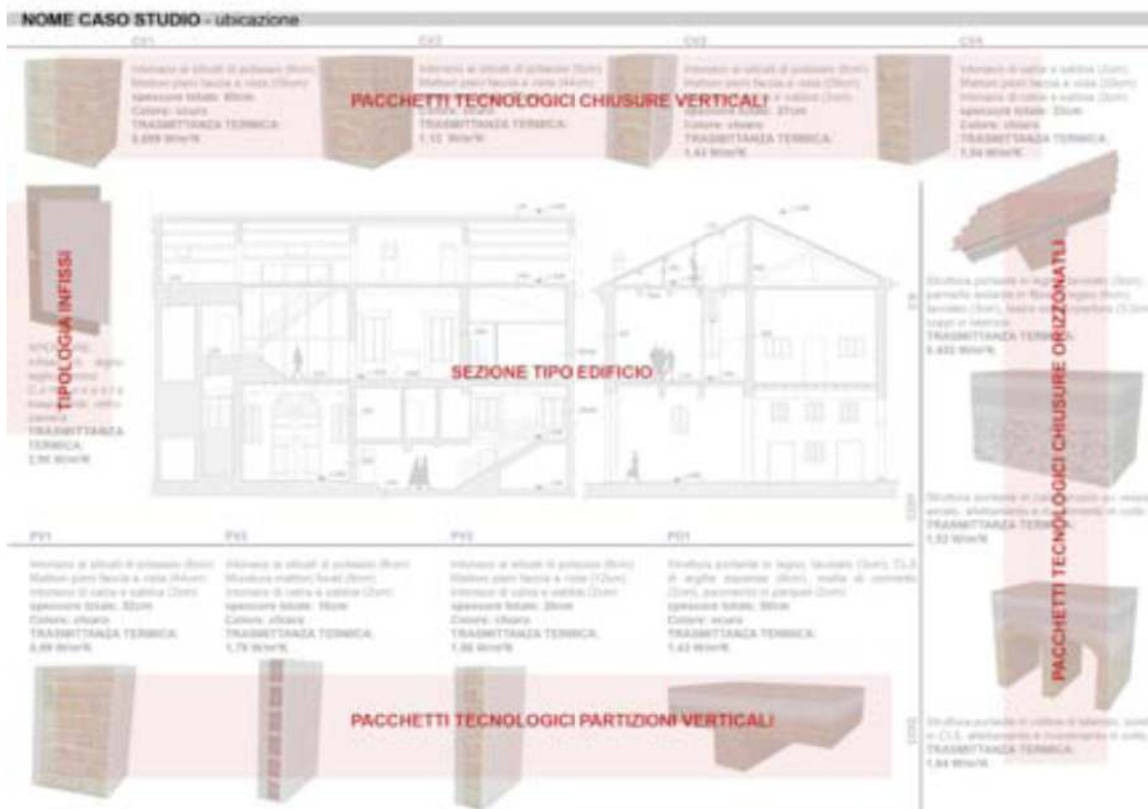


Figura 7.1. Scheda tecnologica *tipo* dei casi studio. Nella scheda sono rappresentati i principali componenti tecnologici che costituiscono l'involucro edilizio. In alto sono descritte le chiusure verticali, in basso le partizioni interne, a destra le chiusure orizzontali inferiori e superiori e a sinistra la tipologia di serramento. Al centro dell'immagine c'è una sezione rappresentativa della volumetria peculiare dell'edificio.

Tutte le informazioni contenute nelle schede descrittive rappresentano i dati richiesti dai metodi di calcolo per le simulazioni energetiche dei casi studio. Essi rappresentano l'oggetto stesso della trattazione.

Ciascuno dei casi studio è stato simulato mediante tre diversi metodi di calcolo:

- *metodo analitico standardizzato*: calcolo analitico, condotto secondo le indicazioni contenute nella UNI TS 11300, parti 1 e 2. E' stato utilizzato il *software* come strumento di ausilio MC11300®¹⁴;
- *metodo Docet*: calcolo semplificato, riconosciuto dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano),

¹⁴ Mc Impianti 11330 è distribuito da Master Clima sponsorizzato da Aermec www.masterclima.info/?tag=MC+Impianto.

supportato da relativo software *Docet*¹⁵;

- *metodo semplificato UNI TS 11300*: calcolo semplificato, condotto secondo le indicazioni per la semplificazione contenute nel corpo metodologico stesso, da seguire in caso di assenza dei dati specifici richiesti per il calcolo analitico. Anche in questo caso è stato utilizzato il software *MC11300*® come ausilio alla simulazione.

I due metodi di calcolo semplificati sono stati scelti per la loro larga diffusione nel mondo professionale. Il metodo *Docet* è tra i sistemi di calcolo maggiormente diffusi, perché è distribuito gratuitamente e perché ha un'interfaccia grafica estremamente facile. Mentre il metodo di calcolo semplificato indicato dalla UNI TS 11300 è stato scelto perché rappresenta la fonte da cui sono state tratte le semplificazioni più importanti, su cui si basano tutti gli altri strumenti di calcolo. Questi due metodi, pertanto, sono stati scelti, perché le considerazioni generali indicate a seguito della loro applicazione su edifici storici, possono essere estese anche agli altri sistemi di calcolo semplificati oggi esistenti.

Di seguito sono presentati i casi studio di cui è stata condotta la simulazione energetica.

Palazzo Scacerni - Sisti – via Palestro 52, Ferrara

Presentazione caso studio

La casa, nota come palazzo Scacerni ora Sisti, è costituita da una lunga facciata che comprende i numeri civici 50 e 52. L'edificio, le cui origini risalgono probabilmente al primo quarto del XVI secolo, subì varie trasformazioni nel corso dei secoli, fino ai rilevanti interventi dei secoli XIX e XX.

L'intero palazzo è stato interessato da un recente intervento di recupero a fini abitativi dell'ammezzato, di manutenzione delle coperture e di restauro delle facciate. Soltanto il civico 52, però, rappresenta un caso studio per il presente lavoro. Oggetto dell'ultimo intervento di restauro sono quattro unità immobiliari situate nell'ammezzato, nel primo piano e nel sottotetto. Il progetto ha previsto il mantenimento delle quattro unità immobiliari migliorandone la distribuzione, restaurando gli apparati decorativi e prevedendo un adeguamento impiantistico.

Al piano rialzato si trova un'unità immobiliare costituita da quattro stanze più un servizio igienico adibiti ad uso uffici. Le prime due stanze presentano soffitti lignei a caselle e catinelle completamente privi di decorazione; la pavimentazione è in ceramica e moquette, gli intonaci sono cementizi. Questa unità ha subito pesanti interventi di ristrutturazione nella prima e nella seconda metà del XX secolo e non è stata oggetto dell'ultimo restauro.

Al piano ammezzato, con ingresso dal piano terra, si trova un'unità immobiliare adibita a civile abitazione, che prima dell'ultimo restauro verteva in stato di grave degrado.

¹⁵ Il DM 29 Giugno 2009 afferma: "[...] In merito alla metodologia di cui al punto 2 del paragrafo 4, per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale (EPi) e per la produzione dell'acqua calda sanitaria (EP_{acs}), si fa riferimento al metodo di calcolo DOCET, predisposto da CNR ed ENEA, sulla base delle norme tecniche di cui al paragrafo 5.1, il cui software applicativo è disponibile sui siti internet del CNR e dell'ENEA. [...]"
Il software *Docet* è gratuito e disponibile sul sito www.docet.itc.cnr.it.

Il progetto ha previsto il consolidamento dei solai fra piano terra e ammezzato, la sostituzione della pavimentazione con legno e marmo oppure cotto, una migliore distribuzione degli ambienti, il recupero degli infissi esterni, l'inserimento di nuovi impianti tecnologici e lo spostamento della scala, in quanto quella esistente fu inserita nel dopoguerra senza tener conto della configurazione degli ambienti.

Al piano nobile si accede attraverso una scala ricostruita negli anni '50, che giunge ad un grande atrio comune dal quale si accede a due distinte unità immobiliari.

La prima è distribuita su due livelli occupando parte del sottotetto (che presenta ampi vani e volumi). Il progetto in questa parte ha previsto la sostituzione dei pavimenti, l'inserimento di nuovi impianti tecnologici, una diversa distribuzione degli ambienti e l'utilizzo del sottotetto come zona notte e servizi, con il mantenimento e il restauro di tutte le strutture lignee esistenti.

La seconda unità del piano nobile è senza dubbio la più ricca ed interessante di tutto il fabbricato, e anche quella meglio conservata, con una ricca decorazione a stucchi e affreschi.

In alcune stanze le pareti sono caratterizzate da sovrapporte e cornici di stucco, da un camino di marmo e porte in legno riccamente dipinte. Il soffitto a volta di arelle intonacate presenta scene mitologiche a finti rilievi su sfondi ad imitazione di pietre dure e cammei. Il pavimento è in legno di rovere a spina francese di grande dimensione, databile attorno alla prima metà del XIX secolo¹⁶.

L'edificio è stato scelto come caso studio perché è rappresentativo di una tipologia edilizia tipica del contesto urbano di molte città italiane (e in particolare di Ferrara) e per questo molto diffuso sul territorio italiano. Il fabbricato ha destinazione residenziale ma presenta caratteristiche morfologiche e tecnologiche differenti rispetto al tessuto aggregativo di base, che interessa in maniera diffusa il resto del centro storico.

¹⁶ Si rimanda a Cavicchi C., *Relazione finale degli interventi di restauro eseguiti nella casa sita in Ferrara, via Palestro 52, Ferrara, 2007.*



Figura 7.2. Fronte principale di Palazzo Scacerni – Sisti, via Palestro 52 a Ferrara. L'edificio, costruito con materiali della tradizione ferrarese, mostra un prospetto in laterizio faccia a vista, un grande portone di ingresso, finestre incorniciate e cornicione merlato in sommità. Il fronte secondario affaccia su un grande spazio verde retrostante.

La sua complessità lo rende particolarmente interessante ai fini del lavoro, perché permette di testare i diversi metodi di calcolo in una situazione non convenzionale. Le caratteristiche architettoniche del palazzo che hanno motivato la scelta sono molteplici. In seguito alle simulazioni si vedrà come gli stessi elementi che caratterizzano l'edificio abbiano influenzato il calcolo o costituiscano una difficoltà nell'applicazione degli strumenti di calcolo.

L'edificio presenta alcuni aspetti interessanti tipici dell'edilizia storica monumentale come l'androne di ingresso, il portico, il sottotetto e due diverse tipologie di attacco a terra. Il pacchetto tecnologico indicato nella scheda descrittiva con il codice *COI2 - chiusura orizzontale inferiore*, è particolarmente interessante. Il solaio a terra è realizzato con voltine in laterizio, che creano uno spazio di filtro tra l'effettivo pavimento del piano terra e il terreno, di circa un metro di altezza. Questo *zoccolo* permette di creare una micro-ventilazione sotterranea, attivata da piccole finestre che affacciano sull'esterno, che mantiene asciutti e freschi gli elementi che confinano con il terreno. Questo elemento è caratteristico di molti edifici simili del passato, per cui è interessante capire come descriverlo nel calcolo e verificarne l'effettiva influenza

energetica.

Come si vede nella scheda del rilievo architettonico (*Tabella 7.3*), le altezze interpiano sono in media di 4 metri, a differenza delle altezze medie dei locali residenziali dell'*edilizia di base* o di fabbricati di recente costruzione, per cui i volumi riscaldati sono molto elevati.

La conformazione degli ambienti interni è complessa e le diverse unità abitative si intrecciano nel fabbricato. Da un punto di vista energetico questo significa che uno stesso ambiente può avere numerosi scambi termici differenti, tutti da descrivere nelle operazioni di calcolo del comportamento energetico. E' necessario individuare, infatti, tutti gli scambi termici con l'esterno, con il sottotetto o il solaio su voltine e con gli spazi interni non riscaldati (androne e vano scale).

I materiali che compongono l'involucro sono tipici della tradizione costruttiva ferrarese (murature in laterizio faccia a vista e intonaco, soffitti e solai lignei, volte in arellato), come si evince dalla figura 7.4. La definizione dei pacchetti tecnologici, però, è piuttosto complessa perché ci sono numerosi spessori diversi di parete e di solaio e il rilievo mostra il tipico restringimento delle chiusure verticali nei piani più alti.

L'edificio, originariamente vissuto come una singola unità abitativa è oggi diviso in quattro appartamenti. La distinzione in quattro unità immobiliari termicamente indipendenti obbliga a suddividere l'edificio in quattro zone termiche distinte. L'articolazione delle diverse zone termiche, frutto della stratificazione delle modifiche nel corso dei secoli e della grandezza e della complessa morfologica degli ambienti, emerge in modo evidente nei valori elevati del rapporto superficie/volume di ogni singola unità immobiliare, di volta in volta confinanti fra loro, con l'esterno e con ambienti non riscaldati.

Ogni zona termica, esemplificata in figura 7.3, è caratterizzata da un proprio impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria e da differenti terminali di emissione. Questa distinzione permette di ottenere quattro distinti risultati di prestazione energetica, che possono essere presi in esame sia separatamente, sia nel complesso, per una valutazione integrale del fabbricato.



Figura 7.3.

Suddivisione in zone termiche effettuata per condurre il calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio. La zona termica A ha un volume disperdente pari a 617 m³ e una superficie disperdente di 504 m². La zona termica B (attualmente disabitata) ha un volume disperdente pari a 732 m³ e una superficie disperdente di 625 m². La zona termica C ha un volume disperdente pari a 1187 m³ e una superficie disperdente di 1116 m². La zona termica D ha un volume disperdente pari a 1374 m³ e una superficie disperdente di 1163 m².

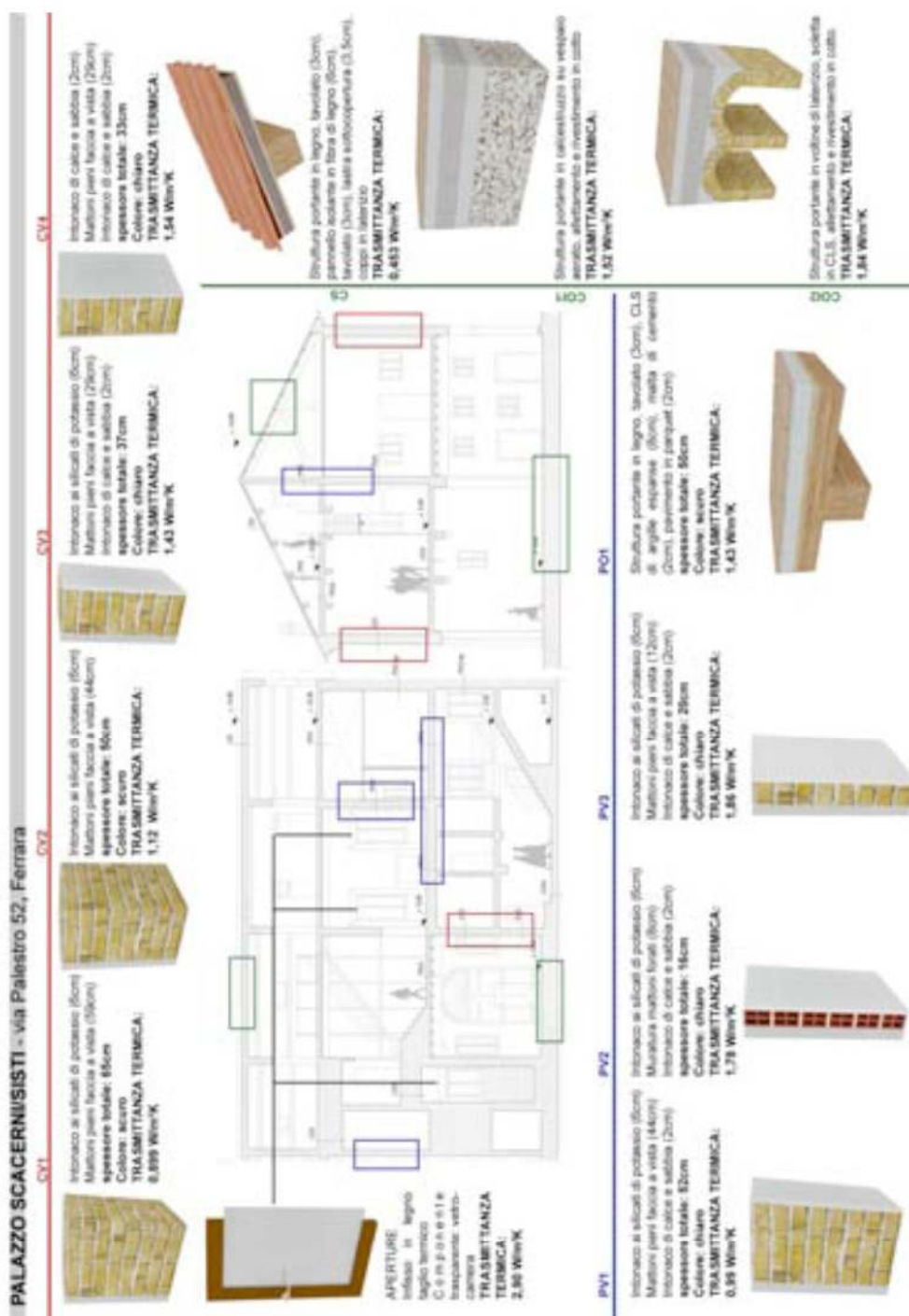


Figura 7.4. Scheda Tecnologica relativa a Palazzo Scerni – Sisti. Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di pacchetti tecnologici. Nella scheda sono rappresentate le più significative. Si rimanda alla tabella 7.4 per la definizione di tutti gli elementi.

		RILIEVO ARCHITETTONICO			
DESCRIZIONE SINTETICA		Palazzo residenziale estense, 3 piani fuori terra, 4 unità abitative, 2 vani scale			
CATEGORIA (DPR 412/93)		E.01. Residenziale continuativo			
PERIODO DI COSTRUZIONE		XVI Secolo			
NUMERO PIANI RISCALDATI					3
NUMERO UNITA' ABITATIVE					4
SUPERFICIE UTILE (edificio)	m ²				788,58
		ZONA TERMICA A	ZONA TERMICA B	ZONA TERMICA C	ZONA TERMICA D
SUPERFICIE DISPERDENTE	m ²	504,07	624,8	1116,03	1116,37
VOLUME LORDO	m ³	616,95	731,92	1186,98	1374,09
FATTORE INCIDENZA VETRATE					0,08
ALTEZZA NETTA A PIANO (MEDIA)	m				4
RAPPORTO S/V (edificio)					0,86
		ZONA TERMICA A	ZONA TERMICA B	ZONA TERMICA C	ZONA TERMICA D
RAPPORTO S/V (zone termiche)		0,817	0,854	0,94	0,847

Tabella 7.3. Rilievo architettonico e dimensionale di Palazzo Scacerni Sisti.

Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica calcolato secondo la UNI EN ISO 6946 espresso in W/m ² K
CV1 (65 cm)	0,899
CV2 (50 cm)	1,121
CV3 (37 cm)	1,436
CV4 (33 cm)	1,547
PV1* (52 cm)	0,998
PV2 (16 cm)	1,786
PV3 (20 cm)	1,864
PV4 (41 cm)	1,195
PV5 (37 cm)	1,272
CO1 (65 cm)	1,529
CO2** (32 cm)	1,844
CO4 (15 cm)	1,542
PO1 (17 cm)	1,435
CS (21 cm)	0,453

* la stratificazione di questo pacchetto tecnologico non è nota, pertanto è stata ipotizzata. Per conoscerla sarebbe necessario un rilievo energetico più preciso attraverso un sondaggio.

** Il calcolo della trasmittanza termica di questa componente tecnologica sarà oggetto della critica successiva

Tabella 7.4. Indicazione delle componenti tecnologiche presenti nella struttura e relativi valori di trasmittanza termica. L'indicazione dimensionale riguarda i soli strati di materiale che concorrono alla determinazione della trasmittanza termica.

Sant'Antonio in Polesine – via del Gambone, Ferrara

Presentazione caso studio

Il monastero

A dispetto del nome del Santo cui il luogo è dedicato, nell'edificio da secoli vivono in clausura le suore benedettine seguaci della fondatrice, Beatrice II d'Este, figlia secondogenita del marchese Azzo VII d'Este e di Giovanna di Puglia. Tra il 1260 e il 1270 Azzo Novello acquistò i terreni e gli edifici dei devoti a San Agostino affinché questi potessero ospitare la comunità fondata dalla figlia.

La Chiesa venne consacrata nel 1413 dal vescovo Pietro Boiardi. Nel piano superiore del monastero si trovavano le celle delle monache e una scala interna le collegava con la Chiesa. Nel 1473, una serie di lavori consentì di separare la Chiesa in due spazi, uno destinato al pubblico e uno riservato alle religiose. Nel 1796 la Chiesa venne chiusa e solo nel 1924 poté ripristinare le sue funzioni religiose.

La chiesa e il convento passarono nel 1866 al demanio dello Stato sotto il controllo del fondo per il Culto. Nel 1910 l'Amministrazione Comunale, essendo venuto meno il numero di monache prescritto dalla legge, acquistò parte del complesso, affidandolo in uso e custodia alle stesse.

Attualmente il monastero si trova nella parte medievale della città di Ferrara e solo una parte di esso ospita ancora le monache.

Il secondo chiostro

Il primo documento relativo alla costruzione del secondo chiostro risale al 1593: nel documento si afferma che i muratori Giacomo e Claudio e i manovali lavorano in convento per tre mesi per fare il secondo chiostro. L'anno successivo l'architetto ducale Alessandro Balbi si reca per tre giorni in convento per vedere una fabbrica in costruzione: si tratta con ogni probabilità del loggiato del secondo chiostro, che viene ad attestarsi su un muro trecentesco del primo chiostro chiudendo i lati nord ed est di due corpi di servizio preesistenti, ortogonali fra loro, di cui il primo a sud databile al XV secolo e il secondo ad ovest fra la fine del XV e l'inizio del XVI secolo. La costruzione di questo primo loggiato, realizzata con una struttura leggera di volte in canniccio intonacato di cui rimangono tracce ancora leggibili sulle murature, rispondeva alla necessità di conferire, seppure con disponibilità economiche assai limitate, la dignità di chiostro a quelle che erano due semplici ali di servizio. Questo primo loggiato costruito nel 1593-94 ebbe comunque vita breve: forse una scadente costruzione ed un conseguente rapido degrado fecero sì che non molti anni dopo si provvedesse alla demolizione e alla ricostruzione dell'edificio.

La nuova costruzione, costituita dai due lati porticati a quattro e otto campate e improntata ad una estrema sobrietà espressiva, esprime un linguaggio architettonico riconducibile all'architetto ferrarese Giovan Battista Aleotti. Al 1610 risale la costruzione, o ricostruzione, della porta di ingresso alla corte esterna del convento in via del Gambone, recentemente restaurata. Secondo testimonianze d'archivio i due lati della loggia del secondo chiostro erano in parte terrazzati e solo in seguito furono sopraelevati per ricavare ambienti abitabili. Una misura di stima del 1805, descrive lo stato del convento dopo la soppressione napoleonica avvenuta nel 1801, specificando la destinazione dei vari ambienti: da tale stima si apprende che il secondo chiostro era adibito a noviziato nel piano superiore, mentre il piano terreno era destinato a servizi. Tali destinazioni d'uso indicherebbero un carattere accessorio di

questa parte del convento, che nel 1910 passa al Municipio, poi al demanio e infine viene destinato e adattato ad alloggio per truppe militari. Quest'ultima fase dei lavori di trasformazione dell'edificio è ampiamente documentata: proprio a questo periodo sono da ascrivere la sopraelevazione dei due lati della loggia per ricavare i dormitori e la chiusura delle porte di comunicazione con il "claustr grande".

Cessato l'uso del secondo chiostro come caserma militare, il complesso è stato affittato per usi decisamente impropri, tra i quali anche un'officina. Le ultime vicende risalgono agli anni 1990 con la parziale attuazione, poi interrotta, di un progetto di restauro commissionato dall'Università di Ferrara; tra il 1993 e il 1995 si sono svolti lavori di restauro e scavo al secondo chiostro in vista di un recupero funzionale della struttura¹⁷.

Questo caso studio è stato selezionato perché rappresenta una seconda tipologia di edificio storico, diversa dalla precedente per conformazione e destinazione d'uso. In questo caso si tratta di un edificio costruito su un lotto, libero su tutti i lati, separato dal resto dell'aggregato urbano dalle tipiche cortine murarie che definivano i lotti nell'antichità.

Le caratteristiche interessanti di questo edificio sono legate alla ricchezza volumetrica, all'altezza interpiano, ai volumi di grandi dimensioni e alla presenza del portico, sopra il quale si estende parte del complesso. Inoltre, a causa delle numerose trasformazioni dovute ai diversi usi impropri che hanno interessato il complesso per anni, le chiusure verticali, massicce e spesse, sono rese estremamente disomogenee da una notevole quantità di aperture (porte e finestre), anche non originali.



Figura 7.5. Due immagini del secondo chiostro di Sant'Antonio in Polesine, via del Gambone 8 a Ferrara. L'edificio è caratterizzato da un chiostro porticato su due lati (a), attribuito all'arch. Gian Battista Aleotti e un fronte interno che affaccia sul giardino retrostante (b). Anche se versa in condizioni precarie il fabbricato mostra aspetti testimoniali molto interessanti.

¹⁷ Alberti A., *Il progetto di restauro: il "riuso" dell'ex monastero di S. Antonio in Polesine come sede di conservazione e studio dei materiali archeologici di epoca medievale e post medievale provenienti da scavi cittadini*, in Guarnieri C., a cura di, *S. Antonio in Polesine, archeologia e storia di un monastero estense*, Fondazione Cassa di Risparmio di Ferrara.

Anche in questo caso, i materiali che compongono l'involucro sono tipici della tradizione (laterizio faccia a vista o scialbatura di intonaco, solai lignei e volte in canniccio).

L'edificio, tuttora disabitato, si presenta privo sia di infissi sia di impianto di riscaldamento. Pertanto, per il calcolo del comportamento energetico dell'edificio, è stato necessario ipotizzare la presenza di entrambi. Il calcolo è stato condotto immaginando soluzioni tecnologiche compatibili con la tradizione costruttiva del periodo a cui risale l'ultimo uso del complesso (anni '80 del '900).



Figura 7.6. Modello tridimensionale dell'edificio. In questo caso la zona termica è unica per l'intero fabbricato.

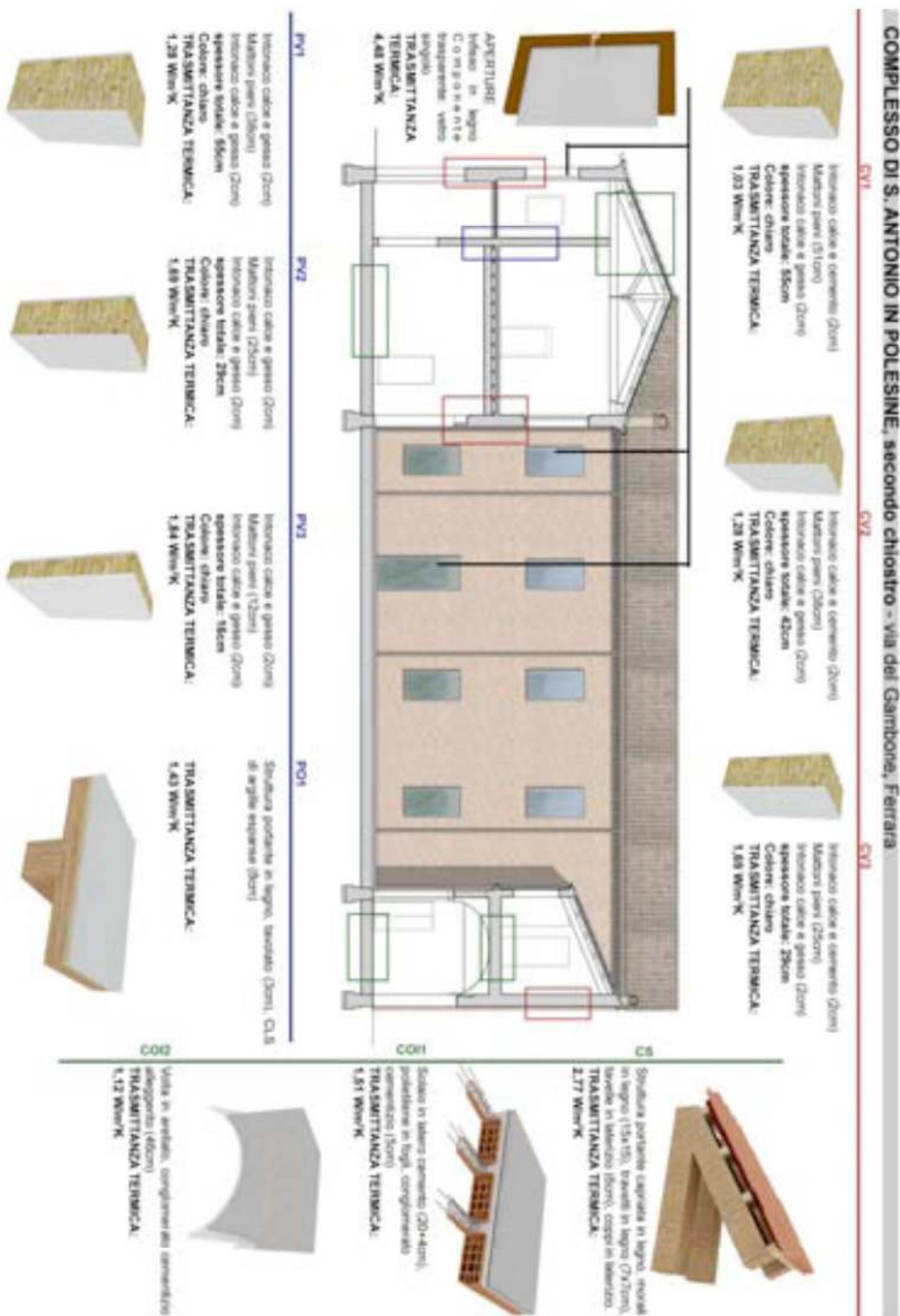


Figura 7.6. Scheda Tecnologica relativa al secondo chiostro del Complesso di S. Antonio in Polesine. Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di pacchetti tecnologici. Nella scheda sono rappresentate le più significative. Si rimanda alla *tabella 7.6* per la definizione di tutti gli elementi.

DESCRIZIONE SINTETICA		RILIEVO ARCHITETTONICO	
DESCRIZIONE SINTETICA		Ex monastero benedettino, 2 piani fuori terra, chiostro in parte porticato	
CATEGORIA (DPR 412/93)		E.01. Collegi, convitti, educandati, ricoveri, orfanotrofi, ospizi, seminari, caserme, conventi	
PERIODO DI COSTRUZIONE		1593 circa	
NUMERO PIANI RISCALDATI		2	
NUMERO UNITA' ABITATIVE		1	
SUPERFICIE UTILE (edificio)		m ²	993,31
		ZONA TERMICA UNICA	
SUPERFICIE DISPERDENTE		m ²	9195,45
VOLUME LORDO		m ³	4250,36
FATTORE INCIDENZA VETRATE			0,06
ALTEZZA NETTA A PIANO (MEDIA)			4,5
RAPPORTO S/V (edificio)			0,46

Tabella 7.5. Rilievo architettonico e dimensionale di S. Antonio in Polesine, secondo chiostro.

Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica calcolato secondo la UNI EN ISO 6946 espresso in W/m ² k
CV1 (55 cm)	1,030
CV2 (42 cm)	1,283
CV3 (29 cm)	1,699
PV1 (55 cm)	1,283
PV2 (29 cm)	1,699
PV3 (16 cm)	1,849
COI1hp* (28 cm)	1,512
COI2 (46 cm)	1,122
PO1 (11 cm)	1,435
CS (14 cm)	2,778

* la stratificazione di questo pacchetto tecnologico non è nota, pertanto è stata ipotizzata. Per conoscerla sarebbe necessario un rilievo energetico più preciso attraverso un sondaggio. Il calcolo della trasmittanza termica di questa componente tecnologica sarà oggetto della critica successiva.

Tabella 7.6. Indicazione delle componenti tecnologiche presenti nella struttura e relativi valori di trasmittanza termica. L'indicazione dimensionale riguarda i soli strati di materiale che concorrono alla determinazione della trasmittanza termica.

Palazzo Cicognara Sani - via Terranuova 23, Ferrara

Presentazione caso studio

Il Palazzo Cicognara - Sani è situato in via Terranuova, l'antica via S. Francesco. Esso costituisce uno degli esempi più significativi dell'architettura civile del Rinascimento a Ferrara, conforme ai dettami di una tradizione locale che in Biagio Rossetti aveva avuto il suo massimo interprete. La critica è concorde nell'attribuzione del palazzo all'architetto Alberto Schiatti che operò a Ferrara tra il 1567 e il 1586. Lo stile Schiatti denota, secondo l'opinione degli studiosi, una formazione schiettamente ferrarese che lo rende un degno continuatore del Rossetti e del Carpi. Il palazzo Sani ripropone lo schema architettonico di Palazzo Crispi, dove si ritrova il bugnato attorno alla porta e alle estremità del prospetto, le finestre rettangolari sormontate da timpani, il cornicione ionico che sostituisce quello corinzio dell'età rossettiana. Osservando la facciata si può osservare che essa non occupa tutto il fronte dell'edificio, che si estende a destra per due metri fin dove c'è una piccola rientranza rispetto alla strada, come dimostrano l'interno e la comunanza di proprietà. Questa striscia che apparirebbe come parte integrante della casa adiacente, non solo non è tale, ma resta come campione, per l'altezza e il cornicione, dello stabile quale doveva essere prima che gli fosse apposta la facciata attuale.

Il caso studio rappresenta un altro esempio di palazzo nobile, destinato a residenza ma con caratteristiche architettoniche molto differenti dagli edifici residenziali comuni.

Anche in questo esempio, come negli altri, si ritrovano altezze interpieno di notevole estensione, che creano volumi riscaldati importanti. L'ingresso al palazzo avviene attraverso due ampi e alti androni di passaggio con cui confinano diversi ambienti riscaldati.



Figura 7.7.

Prospetto principale di Palazzo Cicognara - Sani, via Terranuova 23 a Ferrara. L'edificio ha il prospetto principale su strada in laterizio faccia a vista, arricchito dal portale in bugnato e dalle finestre incorniciate e il prospetto interno, sul giardino, con intonaco.

Tutto l'edificio è sollevato da terra e poggia su un solaio realizzato (come nel caso di Palazzo Scacerni – Sisti) su voltine in laterizio, che staccano letteralmente il pavimento dal terreno.

I materiali che compongono gli elementi di chiusura sono laterizio faccia vista o intonacato e solai lignei. Negli anni '80 del 900 l'intero edificio ha subito un importante intervento di restauro, in parte già orientato al miglioramento delle *performance* energetiche. Per questa ragione, si veda la scheda tecnologica in *figura 7.8*, alcune strutture sono state isolate, attraverso l'uso di un pannello resinato di lana di vetro di 3 o 6 cm¹⁸.

In occasione dell'ultimo restauro l'edificio è stato rifunzionalizzato in modo da ospitare 7 diverse unità immobiliari, indipendenti dal punto di vista energetico (riscaldamento autonomo per ciascuna di esse). Per questa ragione il calcolo del fabbisogno energetico è stato condotto suddividendo l'edificio in 7 corrispondenti zone termiche (*figura 7.7*).

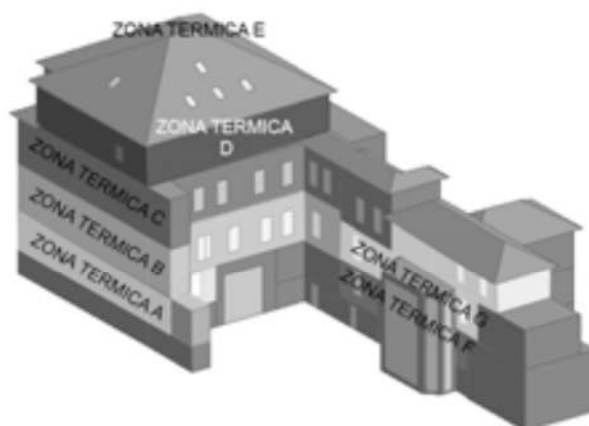


Figura 7.7. Suddivisione in zone termiche fatta per condurre il calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio. La zona termica A (piano ammezzato) ha un volume disperdente pari a 414,7 m³ e una superficie disperdente di 224,7 m². La zona termica B (piano nobile) ha un volume disperdente pari a 1789,5 m³ e una superficie disperdente di 401,4 m². La zona termica C (primo piano) ha un volume disperdente pari a 1871,1 m³ e una superficie disperdente di 275,9 m². La zona termica D (mansarda verso il giardino) ha un volume disperdente pari a 832 m³ e una superficie disperdente di 262,9 m². La zona termica E (mansarda verso strada) ha un volume disperdente pari a 683,7 m³ e una superficie disperdente di 245,4 m². La zona termica F (ala del fabbricato sul giardino – primo piano) ha un volume disperdente pari a 238,8 m³ e una superficie disperdente di 194,6 m². La zona termica G (ala del fabbricato sul giardino – secondo piano) ha un volume disperdente pari a 861,2 m³ e una superficie disperdente di 517,3 m².

¹⁸ Elementi corrispondenti, nella scheda tecnologica, dai codici CV1-chiusura verticale1, CV2 - chiusura verticale2 e COS - chiusura orizzontale superiore.

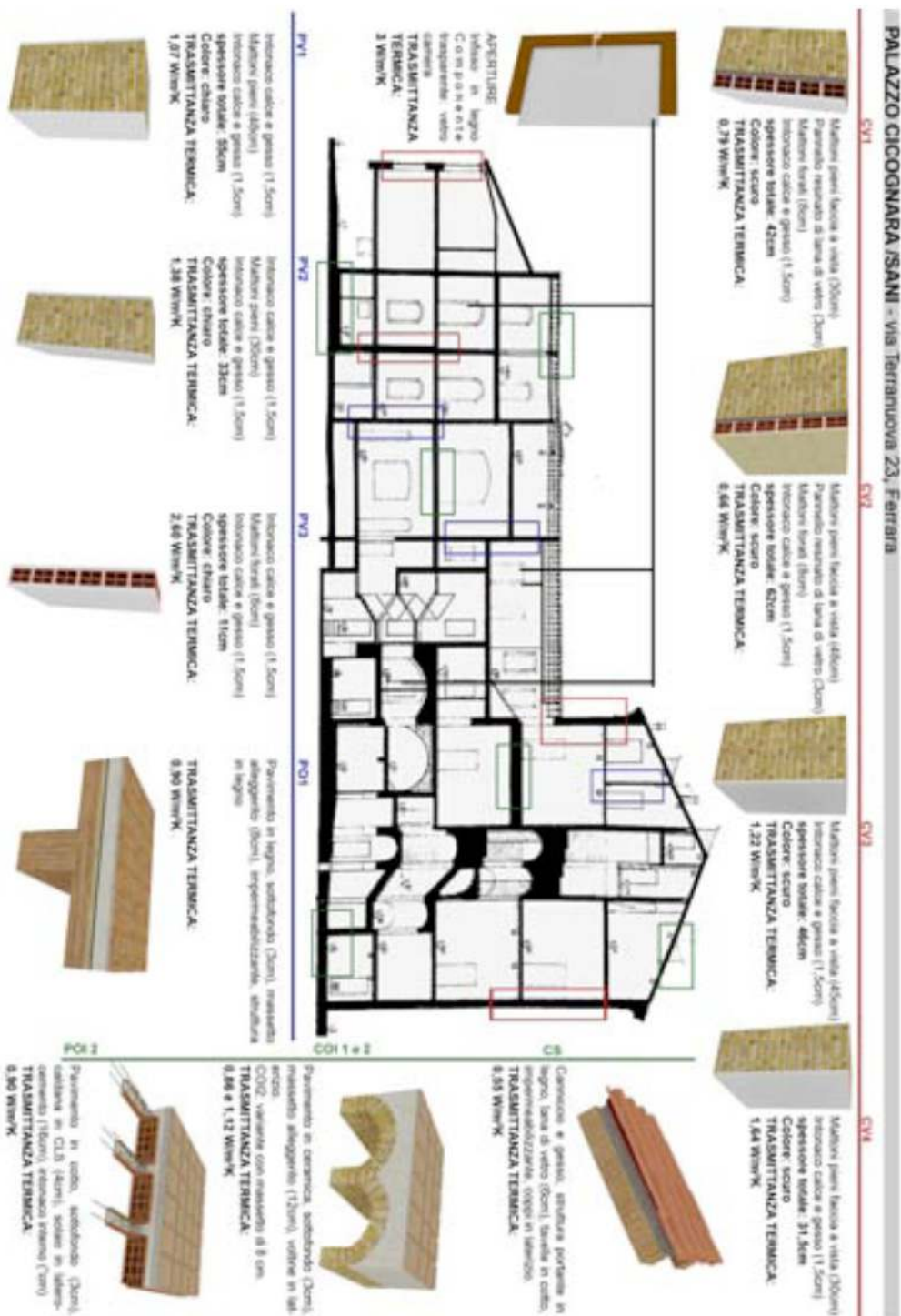


Figura 7.8. Scheda Tecnologica relativa a Palazzo Cicognara Sani. Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di pacchetti tecnologici. Nella scheda sono rappresentate le più significative. Si rimanda alla *tabella 7.8* per la definizione di tutti gli elementi.

		RILIEVO ARCHITETTONICO							
DESCRIZIONE SINTETICA		Palazzo residenziale estense, 4 piani fuori terra, 7 unità abitative, 2 vani scala							
CATEGORIA (DPR 412/93)		E.01. Residenziale continuativo							
PERIODO DI COSTRUZIONE		tra il 1567 e il 1586							
NUMERO PIANI RISCALDATI								3	
NUMERO UNITA ABITATIVE								7	
SUPERFICIE UTILE (edificio)	m ²							3600	
		ZONA TERMICA A	ZONA TERMICA B	ZONA TERMICA C	ZONA TERMICA D	ZONA TERMICA E	ZONA TERMICA F	ZONA TERMICA G	
SUPERFICIE DISPERDENTE	m ²	224,77	401,4	275,9	262,9	245,4	194,6	517,3	
VOLUME LORDO	m ³	414,7	1789,5	1871,1	832	683,7	238,8	861,2	
FATTORE INCIDENZA VETRATE		0,08	0,08	0,1	0,05	0,05	0,08	2,13	
ALTEZZA NETTA A PIANO (MEDIA)	m	4	4,5	4,5	3,5	3,5	4	4	
RAPPORTO S/V (edificio)								0,431	
		ZONA TERMICA A	ZONA TERMICA B	ZONA TERMICA C	ZONA TERMICA D	ZONA TERMICA E	ZONA TERMICA F	ZONA TERMICA G	
RAPPORTO S/V (zone termiche)		0,541	0,224	0,148	0,316	0,359	0,821	0,613	

Tabella 7.7. Rilievo architettonico e dimensionale di Palazzo Cicognara Sani.

Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica calcolato secondo la UNI EN ISO 6946 espresso in W/m ² k
CV1 (42 cm)	0,796
CV2 (62 cm)	0,663
CV3 (46 cm)	1,222
CV4 (31,5 cm)	1,641
PV1 (55 cm)	1,076
PV2 (33 cm)	1,388
PV3 (11 cm)	2,608
COI1(20 cm)	0,861
COI2 (12 cm)	1,120
PO1 (14 cm)	0,909
PO2 (28 cm)	1,372
PO3 (14 cm)	1,301
CS (12 cm)	0,557

* la stratificazione di questo pacchetto tecnologico non è nota, pertanto è stata ipotizzata. Per conoscerla sarebbe necessario un rilievo energetico più preciso attraverso un sondaggio.

** Il calcolo della trasmittanza termica di questa componente tecnologica sarà oggetto della critica successiva

Tabella 7.8. Indicazione delle componenti tecnologiche presenti nella struttura e relativi valori di trasmittanza termica. L'indicazione dimensionale riguarda i soli strati di materiale che concorrono alla determinazione della trasmittanza termica.

Villa Molin Avezzù – via Giovanni Tasso, Fratta Polesine (Rovigo)

Presentazione caso studio

Villa Molin-Avezzù, situata vicino a Villa Badoera, nel comune di Fratta Polesine (Rovigo), è di scuola palladiana ma non si conosce con certezza il nome dell'architetto che la progettò. Fu edificata tra il 1557-1567 per le nozze di Isabella, figlia di Vincenzo Grimani, con Andrea Molin, nobile veneziano che la commissionò.

Molti azzardano l'ipotesi che il progetto fosse di Domenico Gropino, allievo e valido collaboratore del Palladio, che concepì l'edificio all'interno di un sistema urbano.

Il rapporto con l'ambiente però non è lo stesso di Villa Badoera, perché in questo edificio viene privilegiata la regolarità geometrica di forme e linee che si può notare dal posizionamento della scalinata e delle barchesse (delle quali oggi ne rimane solo una). Esiste un nesso tra le due ville, che si ritrova non solo nell'architettura ma anche negli interni decorati da pittori della stessa scuola.

Nel 1775 come risulta dal catasto veneto, l'edificio era di proprietà di Giovanni Francesco Correr, nobile veneziano.

Il complesso architettonico, orientato come di consueto a nord-sud (a differenza di villa Badoer che è posizionata ad est-ovest), presenta un edificio principale dotato di pronao con esastilo e frontone triangolare a cui si accede attraverso una scalinata suddivisa in due rampe laterali. Distaccata si trova la barchessa, disposta perpendicolarmente ad esso.

La villa presenta all'interno numerosi affreschi, per molto tempo attribuiti a Giallo Fiorentino ma che sono opera di Anonimo Grimani, della cerchia artistica di Giallo Fiorentino e Giuseppe Porta Salviati. Sono raffigurate scene mitologiche e allegoriche.

Il caso studio rappresenta un esempio di villa veneta per famiglie aristocratiche e borghesi, per la vita campestre nel periodo estivo. Tali edifici sono nati con lo scopo di ospitare i proprietari per la villeggiatura e per sfuggire alla calura estiva delle città, ma anche con scopi produttivi, come centro per il controllo delle attività agricole. Per questo sono nate con una funzione di residenza saltuaria e sono state costruite per proteggere in particolare dal caldo estivo, più che dal freddo.

L'edificio è caratterizzato da due piani fuori terra e il sottotetto: il piano terra era destinato ai servizi (cantina, cucina, dispensa, lavanderia), al piano nobile abitava il proprietario aprendo agli ospiti i saloni di rappresentanza (in particolare il salone principale occupa tutto il corpo centrale dell'edificio), mentre il sottotetto, uno spazio grande quanto l'intera pianta della villa e con un'altezza notevole (fino a 7,30 m) serviva da deposito al grano e fungeva anche da isolamento nella stagione invernale.



Figura 7.9. Fronte principale di Villa Molin Avezù, Fratta Polesine (Rovigo). L'edificio, di epoca palladiana, mostra il tipico timpano di facciata con colonne e scale a evidenziare l'ingresso, che avviene dal primo piano. Il basamento ospitava tutte le funzioni di servizio tipiche delle ville campestri del Cinquecento.

Le altezze dei locali sono tutte molto significative e il piano terra e le stanze del primo piano, a lato del salone centrale, sono coperte con volte a botte, in alcuni casi affrescate. L'ambiente principale del primo piano, invece, ha un soffitto ligneo piano (con cassettoni decorati).

Le chiusure verticali sono quelle tipiche dell'architettura Palladiana e del suo periodo. Come descrive lo stesso Palladio nei *Quattro libri dell'Architettura* "I muri di pietra cotta [...] si debbono fare che nella parte di dentro e in quella di fuori siano di quadrello e nel mezzo pieni di cementi insieme col coppo pesto. E che ogni tre piedi di altezza vi siano tre corsi di quadrelli maggiori degli altri che pigliano tutta la larghezza del muro"¹⁹. Pertanto, le chiusure e le partizioni verticali sono assimilabili al muro a sacco con laterizio e intonaco di calce. Gli spessori sono molto rilevanti, fino a 85 cm nei muri del piano terra su cui poggiano le volte a botte.

Questi spessori così importanti garantiscono delle *performance* energetiche assai buone per quanto riguarda la trasmittanza termica dei componenti tecnologici verticali.

L'edificio, per quanto riguarda la simulazione energetica, è costituito da una sola zona termica. Nella realtà viene riscaldato il solo piano terra con una caldaia tradizionale e i radiatori. Per portare a termine la simulazione energetica è stato ipotizzato di riscaldare l'intero edificio dimensionando l'impianto sul volume totale.

¹⁹ Palladio A., *I Quattro libri dell'Architettura*, Apresso Bartolomeo Carampello, Venezia, 1571, p. 11-13.



Figura 7.10.
Modello tridimensionale dell'edificio. In questo caso la zona termica è unica per l'intero fabbricato.

RILIEVO ARCHITETTONICO	
DESCRIZIONE SINTETICA	Villa di scuola Palladiana
CATEGORIA (DPR 412/93)	E.01. Residenziale continuativo
PERIODO DI COSTRUZIONE	tra il 1557 e il 1567
NUMERO PIANI RISCALDATI	2
NUMERO UNITA' ABITATIVE	1
SUPERFICIE UTILE (edificio)	m ² 1050,5
ZONA TERMICA UNICA	
SUPERFICIE DISPERDENTE	m ² 3387,4
VOLUME LORDO	m ³ 8942,93
FATTORE INCIDENZA VETRATE	0,07
ALTEZZA NETTA A PIANO (MEDIA)	6
RAPPORTO S/V (edificio)	0,488

Tabella 7.9. Rilievo architettonico e dimensionale di Villa Molin Avezzù.

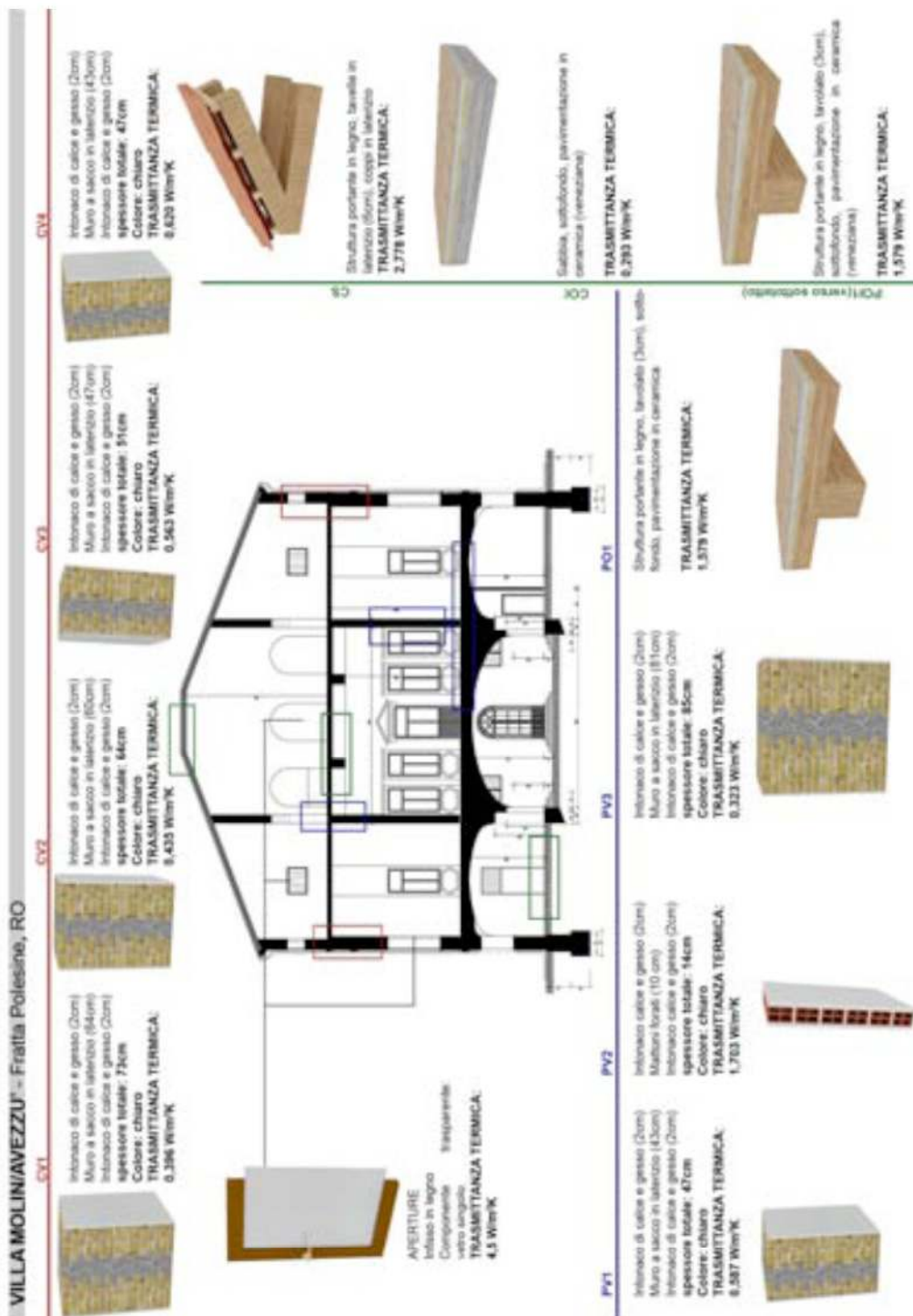


Figura 7.11. Scheda Tecnologica relativa a Villa Molin Avezzu'. Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di pacchetti tecnologici. Nella scheda sono rappresentate le più significative. Si rimanda alla *tabella 7.10* per la definizione di tutti gli elementi.

Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica calcolato secondo la UNI EN ISO 6946 espresso in W/m ² k
CV1 (73 cm)	0,396
CV2 (64 cm)	0,435
CV3 (51 cm)	0,563
CV4 (47 cm)	0,621
PV1 (47 cm)	0,587
PV2 (15 cm)	1,703
PV3 (85 cm)	0,323
COI1 (20 cm)	0,293
PO1 (15 cm)	1,579
PO2 (20 cm)	0,619
CS (12 cm)	2,778

Tabella 7.10. Indicazione delle componenti tecnologiche presenti nella struttura e relativi valori di trasmittanza termica. L'indicazione dimensionale riguarda i soli strati di materiale che concorrono alla determinazione della trasmittanza termica.

Villa Barbaro Maser - via Cornuda, Maser (Treviso)

Presentazione caso studio

Villa Barbaro (già nota come Villa Barbaro Basadonna Manin Giacomelli Volpi) a Maser (Treviso) è una villa veneta, costruita da Andrea Palladio tra il 1554 e il 1560 per l'umanista Daniele Barbaro e per suo fratello Marcantonio Barbaro, ambasciatore della Repubblica di Venezia, trasformando il vecchio palazzo medievale di proprietà della famiglia in una splendida abitazione di campagna consona allo studio delle arti e alla contemplazione intellettuale, decorata con un ciclo di affreschi che rappresenta uno dei capolavori di Paolo Veronese.

Il complesso della villa, che comprende anche un tempietto palladiano, è stato inserito dall'UNESCO nel 1996 – insieme alle altre ville palladiane del Veneto - nella lista dei patrimoni dell'umanità.

La villa sorge a mezza costa sui colli Asolani, poco lontano da una sorgente che secondo la tradizione fu un luogo di culto e forse anche sede di un tempio. Prima di entrare nel patrimonio della famiglia Barbaro, il terreno appartenne ai Pisani e ai Giustiniani.

L'esatta collocazione temporale della costruzione della villa è incerta: Adalberto dal Lago la ritiene databile tra il 1560 e il 1570, altri studiosi retrodatano il completamento dei lavori al 1558, Anthony Hobson propone come anno di inizio dei lavori il 1560: proprio in quell'anno Palladio aveva consegnato le illustrazioni che uno dei due fratelli Barbaro, Daniele, gli aveva chiesto per il proprio commentario sugli scritti di Marco Vitruvio Pollione (*M. Vitruvii de Architectura*, Venezia, 1567).

La personalità dei committenti influenzò sicuramente il progetto: è da attribuire a Daniele, patriarca di Aquileia, la volontà di conferire alla villa un significato sacrale, mentre si deve a Marcantonio, politico e amministratore, ma allo

stesso tempo fine intenditore d'architettura (ricevette un esplicito omaggio da Palladio nei Quattro Libri per l'ideazione di una scala ovata) il disegno del ninfeo retrostante la villa.

Villa Barbaro Maser è uno degli esempi più interessanti di Andrea Palladio per quanto riguarda l'architettura della villa. In particolare, è assai significativa anche per gli aspetti di controllo ambientale, già cari all'architetto nel Cinquecento. La costruzione della villa, generalmente pensata principalmente per le attività durante il periodo estivo, in questo caso è pensata per essere abitata durante tutto l'anno.

L'edificio è costituito da un corpo principale abbracciato dalle tipiche barchesse venete, edifici di servizio ai lato della casa. Sia il corpo centrale sia le barchesse sono distribuiti su due piani. La pendenza del terreno comporta che il piano nobile sia sopraelevato nel prospetto frontale, mentre sul retro, verso la collina, esso dia direttamente accesso al giardino segreto retrostante.

Gli ambienti del piano terra, dal soffitto piuttosto basso, erano in parte adibiti ad uso agricolo.

Il portico, benché progettato seguendo le proporzioni degli antichi monumenti dell'epoca romana, ha una funzione strettamente legata alla vita quotidiana della villa, quindi protegge dalle intemperie, permette di passare rapidamente da un lato all'altro dell'edificio e funge da spazio di grande importanza e funzionalità per i lavori di campagna. Dai porticati si accede, attraverso due doppie scalinate, direttamente al piano nobile, riservato alla famiglia e agli ospiti. Fulcro delle stanze di rappresentanza è la sala con volta a crociera, l'ambiente centrale del corpo avanzato. Da qui, oltre a due piccoli ambienti di servizio, si può accedere alle sale verso la facciata.



Figura 7.12.
Villa Barbaro, Maser (Treviso). L'immagine mostra il fronte principale dell'edificio, caratterizzato dal corpo principale, più alto, con lesene e timpano, nella classica conformazione a tempio, circondato dalle barchesse, i lunghi corpi di servizio ai lati, con portici.

Come per il caso studio precedente, le chiusure verticali sono quelle descritte dallo stesso Andrea Palladio nei *Quattro libri*, pertanto sono assimilabili al muro a sacco con laterizio e intonaco di calce. Anche in questo caso ci sono spessori molto ingenti che permettono di raggiungere ottime prestazioni energetiche sia invernali, sia estive.

Per quanto riguarda la simulazione energetica, la villa è costituita da una sola zona termica.



Figura 7.13. Modello tridimensionale dell'edificio. In questo caso la zona termica è unica per l'intero fabbricato.

DESCRIZIONE SINTETICA		RILIEVO ARCHITETTONICO	
CATEGORIA (DPR 412/93)		Villa Palladiana di campagna	
PERIODO DI COSTRUZIONE		E.01. Residenziale continuativo	
NUMERO PIANI RISCALDATI		tra il 1554 e il 1560	2
NUMERO UNITA' ABITATIVE			1
SUPERFICIE UTILE (edificio)	m ²		2994,1
		ZONA TERMICA UNICA	
SUPERFICIE DISPERDENTE	m ²		10594,1
VOLUME LORDO	m ³		15159,3
FATTORE INCIDENZA VETRATE			0,06
ALTEZZA NETTA A PIANO (MEDIA)			6
RAPPORTO S/V (edificio)			0,099

Tabella 7.11. Rilievo architettonico e dimensionale di Villa Barbaro Maser.

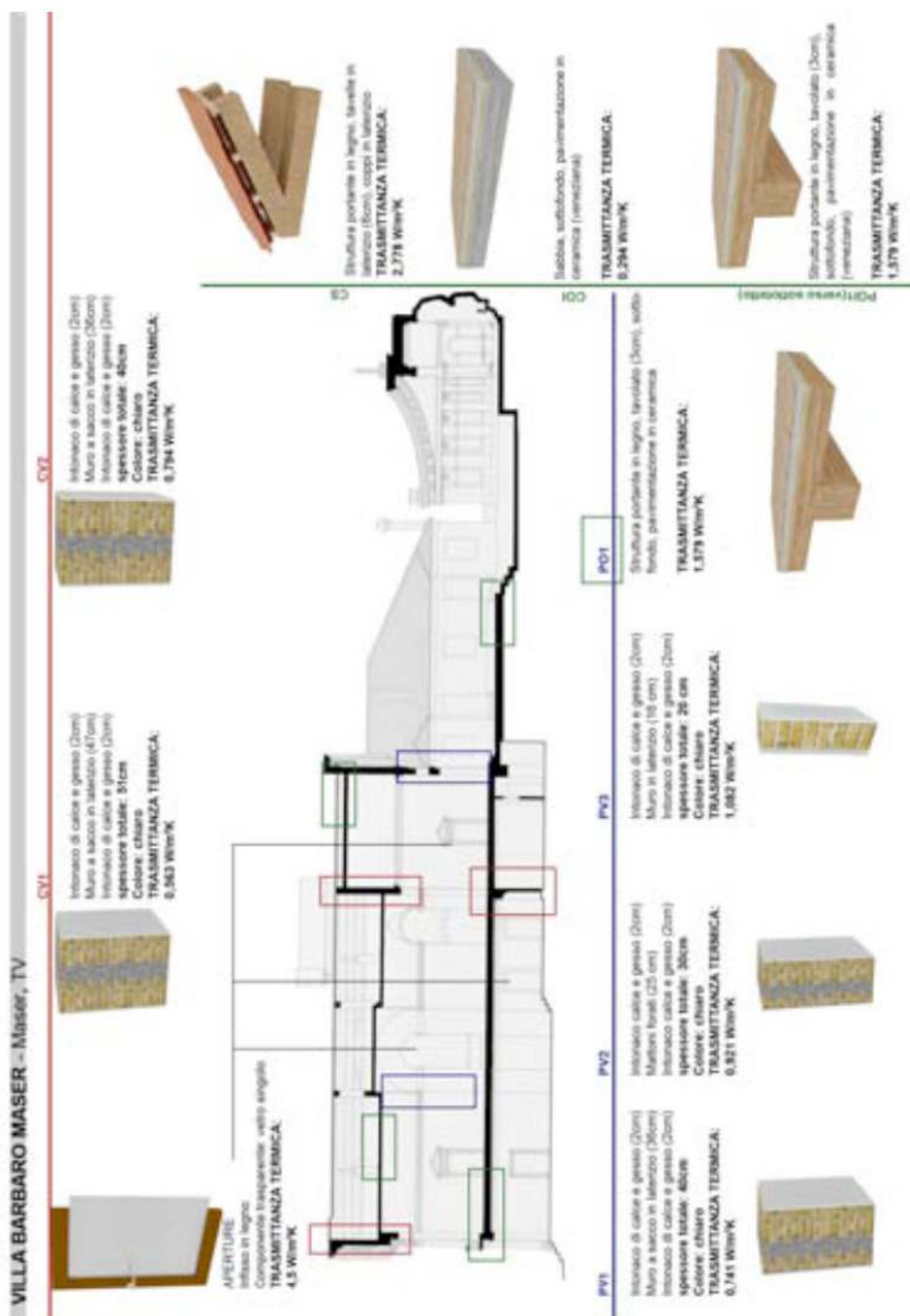


Figura 7.14. Scheda Tecnologica relativa a Villa Barbaro Maser. Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di pacchetti tecnologici. Nella scheda sono rappresentate le più significative. Si rimanda alla *tabella 7.12* per la definizione di tutti gli elementi.

Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica calcolato secondo la UNI EN ISO 6946 espresso in W/m ² k
CV1 (51 cm)	0,563
CV2 (40 cm)	0,794
PV1 (40 cm)	0,741
PV2 (30 cm)	0,921
PV3 (20 cm)	1,082
CO11 (20 cm)	0,294
PO1 (15 cm)	1,579
CS (12 cm)	2,778

Tabella 7.12. Indicazione delle componenti tecnologiche presenti nella struttura e relativi valori di trasmittanza termica. L'indicazione dimensionale riguarda i soli strati di materiale che concorrono alla determinazione della trasmittanza termica.

7.3.2. Risultati delle simulazioni

In figura 7.15 sono rappresentati in maniera sintetica i risultati delle simulazioni dei casi studio. Si può osservare che esiste uno scostamento considerevole fra i risultati ottenuti con diversi metodi di calcolo.

Come si vede nelle Tabelle 7.13 e 7.14, che riportano i risultati delle singole simulazioni, lo scostamento medio tra i dati ottenuti con il metodo *Docet* e quelli ottenuti con metodo analitico standardizzato è del 40% ed è molto più elevato (quasi il doppio) rispetto al *gap* con il metodo semplificato UNI TS 11300, che è del 20%. Questo conferma l'ipotesi alla base della ricerca. Inoltre, la differenza dell'errore di valutazione verificato nell'applicazione dei due metodi semplificati, come si dimostrerà in seguito, dipende dalla maggiore precisione del metodo semplificato UNITS 11300 che ricorre a un numero inferiore di semplificazioni rispetto al sistema *Docet*.

Il corpo metodologico di calcolo definito dalla normativa prevede l'inserimento dei dati per la caratterizzazione termica dell'edificio, secondo un ordine preciso.

La trattazione è impostata in modo da ripercorrere il calcolo condotto con i diversi metodi per la simulazione energetica dei casi studio, secondo questo stesso ordine, per verificare quali siano i passaggi che hanno determinato lo scostamento tra i risultati. L'individuazione degli elementi che causano lo scarto è uno dei risultati della tesi, perché rappresenta il primo passo verso la messa a punto di metodi di calcolo delle prestazioni energetiche, specifici per gli edifici storici. Isolando i singoli passaggi del calcolo è possibile indicare quali debbano essere variati per migliorare il risultato e diminuire lo scostamento.

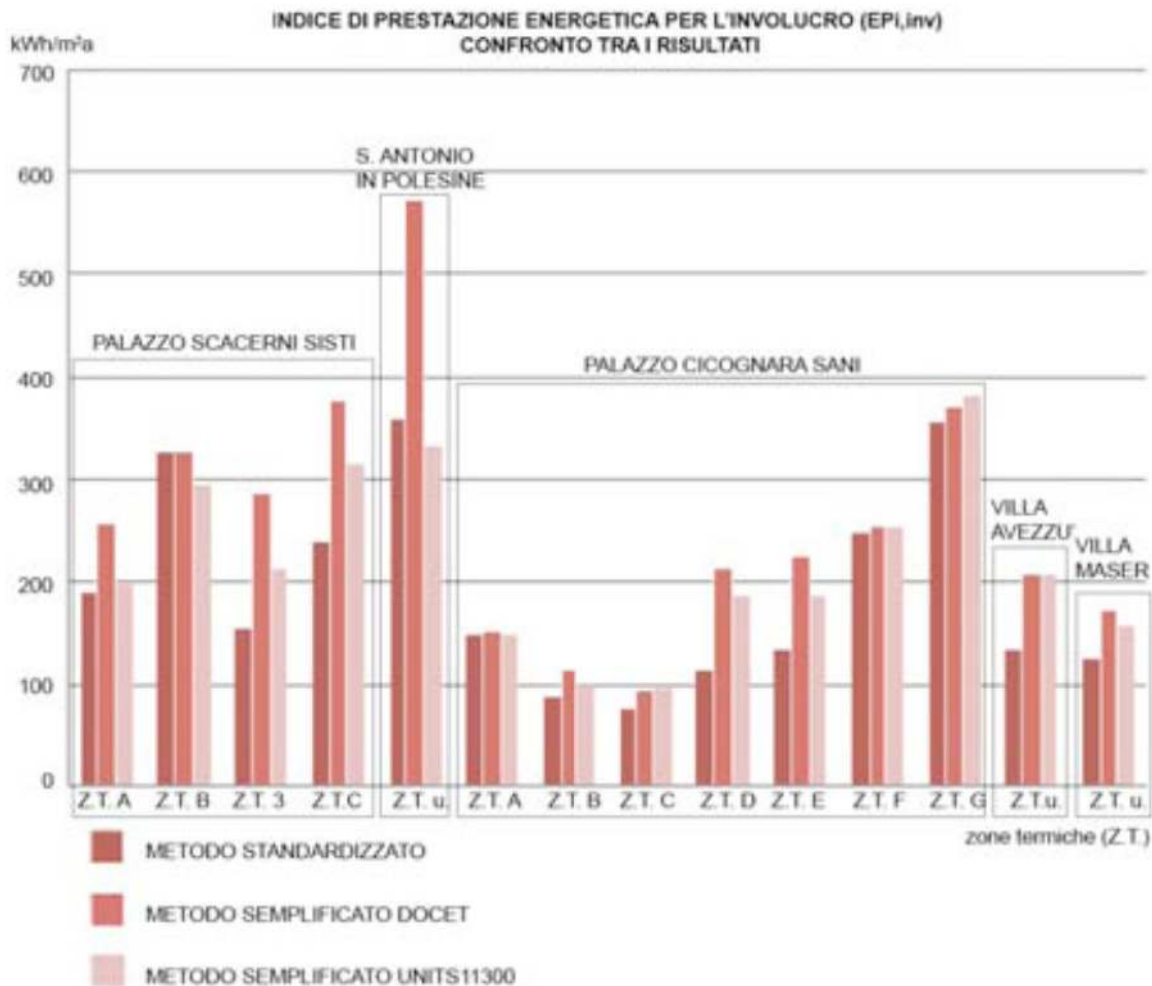


Figura 7.15. Risultati delle simulazioni energetiche dei casi studio allo stato di fatto. Il Grafico mette a confronto il risultato ottenuto con il metodo standardizzato e i metodi semplificati UNI TS11300. Ciascun caso studio è stato analizzato in base alle zone termiche in cui è suddiviso (Z.T.). Si nota che i metodi semplificati sono sempre conservativi rispetto al metodo analitico (standardizzato).

Casi studio	INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO $EP_{i,INV}$ – METODO <i>DOCET</i>			
	Zone termiche	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo standardizzato (kWh/m ² a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i> (kWh/m ² a)	Scostamento tra i risultati %
Palazzo Scacemi Sisti	A	188,8	254,8	+ 35
	B	326,1	326,5	+ 0,1
	C	153,6	283,8	+ 84,8
	D	239,1	375,1	+ 56,9
	EDIFICIO INTERO	193,5	309,5	+ 59,9
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	328,9	571,9	+ 73,8
	EDIFICIO INTERO	328,9	571,9	+ 73,8
Palazzo Cicognara Sani	A	147,6	152,2	+ 3,1
	B	88,2	113,8	+ 29
	C	76,3	92,7	+ 21,5
	D	114,2	211,5	+ 85,2
	E	133,1	224,8	+ 68,9
	F	246,3	252,1	+ 2,2
	G	354,3	369,9	+ 4,4
	EDIFICIO INTERO	143,3	179,7	+25,4
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	133,1	207,3	+ 55,7
	EDIFICIO INTERO	133,1	207,3	+ 55,7
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	124,4	172,1	+ 38,3
	EDIFICIO INTERO	124,4	172,1	+ 38,3
SCOSTAMENTO MEDIO				+ 40

Tabella 7.13. Risultati delle simulazioni operate sui casi studio, mettendo a confronto l'Indice di prestazione energetica per l'involucro ottenuto con metodo analitico standardizzato (colonna 3) e con metodo semplificato *Docet* (colonna 4). Per ciascun caso studio è stato fornito il valore relativo alle singole zone termiche e all'edificio nel suo complesso.

Casi studio	INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO $EP_{i,INV}$ – METODO UNI TS 11300			
	Zone termiche	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo standardizzato (kWh/m^2a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo semplificato UNI TS 11300 (kWh/m^2a)	Scostamento tra i risultati %
Palazzo Scacemi Sisti	A	188,8	198,2	+ 5
	B	326,13	294,4	-9,6
	C	153,6	213,7	+ 39,1
	D	239,1	313,9	+ 31,3
	EDIFICIO INTERO	193,5	251,62	+58
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	328,9	335,9	+2
	EDIFICIO INTERO	328,9	331,3	+ 2
Palazzo Cicognara Sani	A	147,6	147,3	- 0,2
	B	88,2	99,8	+ 13,2
	C	76,3	94,4	+ 23,7
	D	114,2	186,7	+ 63,5
	E	133,1	186,8	+ 40,3
	F	246,3	252,1	+ 2,4
	G	354,3	380,2	+ 7,3
	EDIFICIO INTERO	143,3	155,94	+ 8,6
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	133,1	205,2	+ 54,2
	EDIFICIO INTERO	133,1	205,2	+ 54,2
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	124,4	155,8	+ 25,2
	EDIFICIO INTERO	124,4	172,1	+ 25,2
SCOSTAMENTO MEDIO				+21

Tabella 7.14. Risultati delle simulazioni operate sui casi studio, mettendo a confronto l'Indice di prestazione energetica per l'involucro ottenuto con Metodo standardizzato (colonna 3) e con metodo semplificato Uni TS 11300 (colonna 4). Per ciascun caso studio è stato fornito il valore relativo alle singole zone termiche e all'edificio nel suo complesso.

7.4. Limitazione del campo di indagine: definizioni e motivazioni

Il corpo metodologico per il calcolo analitico del comportamento energetico degli edifici sia contenuto nella UNI EN ISO 13790:2008.

I metodi forniti da questa norma²⁰ comprendono il calcolo dei seguenti termini:

²⁰ La UNI TS11300 è la specifica tecnica che definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008.

- 1) lo scambio termico per trasmissione e ventilazione dell'edificio quando esso è riscaldato o raffrescato ad una temperatura interna costante;
- 2) il contributo degli apporti interni e solari al bilancio termico globale dell'edificio;
- 3) i fabbisogni annuali di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, al fine di mantenere le temperature prefissate di regolazione all'interno dell'edificio.

I punti 1 e 2 sono descritti dalla norma UNI TS 11300 parte 1, mentre i *fabbisogni annuali di energia termica per riscaldamento e raffrescamento* sono trattati nella UNI TS 11300 parte 2.

La norma tecnica **UNI TS 11300 parte 1** fornisce le indicazioni per la determinazione del fabbisogno di energia termica utile dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, cioè l'energia necessaria a mantenere la temperatura di progetto, all'interno dei locali abitati. In sintesi, è la parte dedicata alla descrizione delle caratteristiche geometriche e tecnologiche dell'edificio, che ne definiscono l'involucro.

$$Q_{nd}(\text{energia utile}) = Q_{H,nd} + Q_{C,nd} \text{ [MJ]} \quad (1)$$

Dove:

$Q_{H,nd}$ = fabbisogno di energia termica per il riscaldamento invernale

$Q_{C,nd}$ = fabbisogno di energia termica per il raffrescamento estivo

La **UNI TS11300 parte 2**, invece, contiene le istruzioni per la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Questa seconda parte si riferisce alla componente impiantistica, per calcolare l'energia primaria per la climatizzazione invernale. Indica, pertanto, il metodo per quantificare l'energia che l'impianto deve fornire all'edificio perché sia mantenuta la temperatura di progetto all'interno dei locali. Esso considera, nel calcolo, il rendimento dell'impianto stesso, valutando, perciò, anche le perdite dell'impianto in base ai quattro sotto - sistemi che lo costituiscono (generazione, regolazione, distribuzione e emissione).

$$E_p(\text{energia primaria}) = Q_{nd} + Q_{cl,g} + Q_{cl,rg} + Q_{cl,d} + Q_{cl,e} \text{ [kWh/m}^2\text{a]} \quad (2)$$

Dove:

Q_{nd} = fabbisogno di energia utile in regime invernale ed estivo

$Q_{cl,g}$ = perdite totali di generazione

$Q_{cl,rg}$ = perdite totali di regolazione

$Q_{cl,d}$ = perdite totali di distribuzione

$Q_{cl,e}$ = perdite totali di emissione

La **UNI TS11300 parte 3** serve a determinare il fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. Questa terza parte della norma definisce, quindi, i metodi di calcolo relativi alla componente impiantistica per stabilire l'energia primaria per la climatizzazione estiva, che l'impianto deve fornire perché sia mantenuta la temperatura di progetto all'interno dei locali, considerando il rendimento dell'impianto stesso (valutando anche le perdite).

$$Q_{C,P} = \sum Q_{aux,k} \times f_{p,el} + \sum_k \left[\sum_x \left(\frac{Q_{Cr,k,x} + Q_{V,k,x}}{\eta_{mm,k,x}} \right) \right] \times f_{p,x} \quad [\text{KWh}] \quad (3)$$

Dove:

$Q_{aux,k}$ = fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di climatizzazione;

Q_{Cr} = fabbisogno effettivo per raffrescamento;

$Q_{v,k,x}$ = fabbisogno per trattamenti aria;

$\eta_{mm,k,x}$ = coefficiente di prestazione medio mensile del sistema di produzione dell'energia frigorifera;

$f_{p,el}$ = fattore di conversione da energia elettrica a energia primaria (UNI TS 11300-2:2008);

$f_{p,x}$ = fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico utilizzato dal generatore;

k = mese k -esimo della stagione di climatizzazione estiva (punto 10 della UNI TS 11300-1:2008);

x = indice che indica le diverse fonti di energia in ingresso.

Il lavoro ha l'obiettivo di stabilire la bontà dei metodi di calcolo applicati all'edificio storico, pertanto, focalizza la propria attenzione sulla parte del calcolo legata alla definizione delle caratteristiche termiche direttamente legate all'edilizia storica. Quindi interessa tutti gli elementi relativi a:

- Involucro:** tecnologie costruttive, materiali impiegati, composizione dei singoli elementi;
- Morfologia:** tipologia edilizia, aspetti dimensionali (superfici e volumi riscaldati, rapporto S/V, etc..) e articolazione interna.

Questi aspetti sono gli stessi che vengono direttamente coinvolti dalle operazioni di riqualificazione energetica e che impongono scelte più delicate nel momento della progettazione dell'intervento. L'involucro e la morfologia dell'edificio costituiscono gli elementi più importanti nella definizione della prestazione energetica dell'edificio. Da essi dipende:

a. la scelta della chiusura su cui intervenire: stabilire quale sia il componente tecnologico che maggiormente influisce sul fabbisogno di energia termica per il riscaldamento permette di limitare gli interventi solo dove strettamente necessario;

b. la scelta del tipo di isolante e la zona di posa: conoscere il comportamento termico dei materiali che compongono l'involucro consente di scegliere il tipo di isolamento più appropriato in relazione alle esigenze richieste dal particolare edificio (innalzamento della prestazione invernale attraverso maggiore isolamento o esaltazione della prestazione estiva attraverso lo sfruttamento dell'inerzia termica);

c. la scelta di sostituire infissi e/o altri elementi deteriorati con elementi più performanti o di incrementare la prestazione energetica di quelli esistenti;

d. il tipo di impianto, da sostituire o aggiungere, più adatto al tipo di richiesta energetica che l'edificio, come involucro antico, richiede.

In base a queste premesse, la valutazione critica al metodo di calcolo, applicato ai casi studio prima presentati, è riferita **alla sola parte 1 della UNI TS 11300**.

Sono escluse dalla trattazione le parti 2 e 3 della UNI TS 11300 in primo luogo perché la critica alla valutazione del comportamento energetico dello stato di fatto di un edificio storico è fatta a prescindere dalla componente impiantistica dell'edificio. In molti edifici storici la componente impiantistica non c'è (se l'analisi viene fatta prima di un intervento di restauro, per esempio), o, se c'è, essa non è coeva all'edificio stesso. Questo significa che non fa parte del fabbricato antico ma è solo il risultato delle sue trasformazioni nel tempo. Dal momento che non è caratteristica del fabbricato storico, in merito alla definizione degli impianti, sono ritenute valide, per questa analisi, le indicazioni del corpo metodologico di calcolo (analitico e semplificato) elaborate per gli edifici nuovi o di recente costruzione. Questo significa che le parti 2 e 3 della normativa sono state necessarie per condurre il calcolo della prestazione energetica dei casi studio, ma le loro indicazioni non sono oggetto di analisi e vengono ritenute valide a priori.

Un'altra limitazione di campo riguarda la definizione degli apporti interni, contenuta nel metodo di calcolo del fabbisogno di energia utile descritto nella parte 1 della UNI TS 11300.

Il fabbisogno di energia termica utile $Q_{H,nd}$ – per riscaldamento e $Q_{C,nd}$ – per raffrescamento è dato dalla somma delle perdite per trasmissione e ventilazione attraverso l'involucro a cui vanno tolti gli apporti interni e quelli solari (e viceversa per raffrescamento).

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} (Q_{int} + Q_{sol}) \quad [\text{kWh}] \quad (4)$$

$$Q_{C,nd} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad [\text{kWh}] \quad (5)$$

Dove:

$Q_{H,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso del riscaldamento;

$Q_{H,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso del riscaldamento;

$Q_{C,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso del raffrescamento;

$Q_{C,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso del raffrescamento;

Q_{int} = apporti termici interni;

Q_{sol} = apporti termici solari;

$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti termici.

$\eta_{C,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

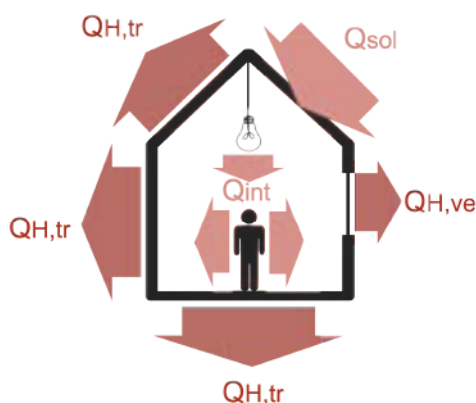


Figura 7.16.

Schema degli scambi termici per trasmissione e ventilazione e degli apporti interni e solari.

Tra tutti gli aspetti coinvolti nel calcolo dell'energia termica utile, saranno considerati soltanto gli scambi termici per **trasmissione e ventilazione** compresi gli **apporti solari**, che dipendono fortemente dai materiali e dalla morfologia dell'edificio. Non è oggetto di analisi il computo degli apporti interni perché essi non dipendono strettamente dalla tecnologia costruttiva dell'edificio storico, ma soltanto dall'uso e dal tipo di utenza che lo abita. Sono stati considerati nel calcolo, ma non viene analizzato criticamente il modo in cui il corpo metodologico prescrive di calcolarli, che si considera valido anche per l'uso in edifici storici.

Pertanto l'analisi si concentra su²¹: (in **grassetto** le parti prese in considerazione)

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} (Q_{int} + Q_{sol}) \quad [\text{kWh}] \quad (6)$$

$$Q_{C,nd} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} (Q_{C,tr} + Q_{H,ve}) \quad [\text{kWh}] \quad (7)$$

Dove:

$Q_{H,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso del riscaldamento;

$Q_{H,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso del riscaldamento;

$Q_{C,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso del raffrescamento;

$Q_{C,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso del raffrescamento;

Q_{int} = apporti termici interni;

Q_{sol} = apporti termici solari;

$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti termici.

$\eta_{C,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

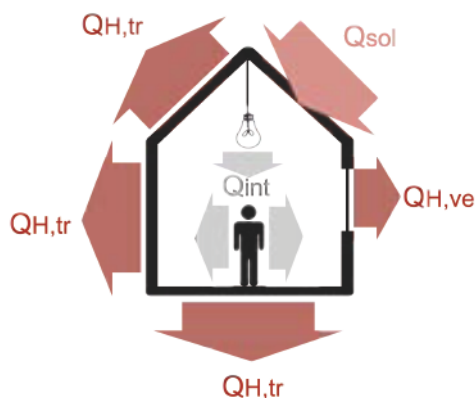


Figura 7.17.

Schema degli scambi termici per trasmissione e ventilazione, in grigio sono indicati gli apporti interni esclusi dalla trattazione.

Per quanto riguarda la valutazione degli apporti solari, si considera la sola parte relativa alla descrizione della capacità da parte dell'involucro (opaco e trasparente) di immagazzinare calore attraverso gli apporti solari, o di difendersi in regime estivo.

Riassumendo, gli aspetti interessanti ai fini della valutazione critica del metodo sono:

²¹ Limitare la trattazione critica solo agli aspetti legati agli scambi termici per trasmissione e ventilazione, non significa che nel calcolo dell'energia termica utile condotto sui casi studio, gli elementi esclusi non siano stati considerati o non siano stati rilevanti nella definizione del risultato. Tale distinzione serve solo ai fini della trattazione critica.

a. Il fabbisogno di energia termica utile per trasmissione, che dipende dal coefficiente globale di scambio termico per trasmissione, dalla differenza di temperatura interno/esterno e dal tempo.

$$Q_{H, tr} = H_{tr, adj} \times (\theta_{int, set, H} - \theta_e) \times t \quad [\text{kWh}] \quad (8)$$

Dove:

$Q_{H, tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso del riscaldamento;

$H_{tr, adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura tra interno ed esterno;

$\theta_{int, set, H}$ = temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata;

θ_e = temperatura media mensile dell'ambiente esterno;

t = durata del mese considerato.

Il calcolo dei coefficienti di scambio termico per trasmissione è effettuato secondo le UNI EN ISO 13789:2008 e UNI EN ISO 13370 e il punto 11 della UNI TS 11300-1.

$$H_{tr, adj} = H_D + H_g + H_U + H_A \quad [\text{W/K}] \quad (9)$$

Dove:

H_D è il coefficiente globale di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno;

H_g , è il coefficiente globale di scambio termico stazionario per trasmissione attraverso il terreno;

H_U , è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non riscaldati;

H_A , è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione attraverso altre zone climatizzate a temperatura diversa.

b. Il fabbisogno di energia termica utile per ventilazione, che dipende dal coefficiente globale di scambio termico per ventilazione, dalla differenza di temperatura interno/esterno e dal tempo.

$$Q_{H, ve} = H_{ve, adj} \times (\theta_{int, set} - \theta_e) \times t \quad [\text{kWh}] \quad (10)$$

Dove:

$Q_{H, ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso del riscaldamento;

$H_{ve, adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura tra interno ed esterno;

$\theta_{int, set}$ = temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata;

θ_e = temperatura media mensile dell'ambiente esterno;

t = durata del mese considerato.

Le diverse tipologie dei sistemi di ventilazione sono descritte nel CEN/TR 14788. Ulteriori descrizioni riguardo alla ventilazione e all'areazione sono fornite nella UNI EN 12792.

$$H_{ve,adj} = \rho_a \times C_a \times \left\{ \sum_k b_{ve,k} \times q_{ve,k,mn} \right\} \text{ [W/K]} \quad (11)$$

Dove:

$\rho_a * C_a$ = capacità termica volumica dell'aria, pari a 1200 J/(m³*K);

$b_{ve,k}$ = fattore di correzione della temperatura per il flusso d'aria k-esimo;

$q_{ve,k,mn}$ = portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo.

Il risultato delle simulazioni sui casi studio, utilizzato per il confronto dei metodi di calcolo, è l'indice di prestazione energetica per l'involucro $Ep_{i, inv}$, che rappresenta la prestazione energetica del solo involucro dell'edificio e non il dato globale Ep_{gl} .

7.5. Valutazione dei metodi di calcolo semplificati.

7.5.1. Impostazione dell'analisi

La UNI TS 11300-1 prescrive quali siano i dati di ingresso per il calcolo della prestazione energetica.

I dati dell'elenco legati agli aspetti non direttamente legati al calcolo del fabbisogno di energia termica utile sono indicati in grigio.

a) dati relativi alle caratteristiche **TIPOLOGICHE** dell'edificio

- volume lordo riscaldato (V_l);
- volume interno (o netto) dell'ambiente climatizzato (V);
- superficie utile (o netta calpestabile) dell'ambiente climatizzato (A_f);
- superfici di tutti i componenti dell'involucro e della struttura edilizia (A);
- le tipologie e le dimensioni dei punti termici (I);
- gli orientamenti di tutti i componenti dell'involucro edilizio;
- le caratteristiche geometriche di tutti gli elementi esterni (altri edifici, aggetti, ecc.) che ombreggiano i componenti trasparenti dell'involucro edilizio.

b) dati relativi alle caratteristiche **TERMICHE** e **COSTRUTTIVE** dell'edificio

- trasmittanze termiche dei componenti dell'involucro edilizio (U);

- capacità termiche areiche dei componenti della struttura dell'edificio (κ);
- trasmittanze di energia solare dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio (g);
- fattori di assorbimento solare delle facce esterne dei componenti opachi trasparenti dell'involucro edilizio ($\alpha_{sol,c}$);
- emissività delle facce esterne dei componenti dell'involucro edilizio (ε);
- fattori di riduzione della trasmittanza di energia solare totale dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio in presenza di schermature mobili (F_{sh});
- fattori di riduzione dovuti al telaio dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio ($1-F_f$);
- coefficienti di trasmissione lineare dei ponti termici (ψ).

c) dati CLIMATICI

- medie mensili delle temperature esterne (θ);
- irradianza solare totale media mensile sul piano orizzontale ($I_{sol,h}$);
- irradianza solare totale media mensile per ciascun orientamento (I_{sol}).

d) dati relativi alle modalità di OCCUPAZIONE e di UTILIZZO dell'edificio

- temperatura interna di regolazione per il riscaldamento ($\theta_{int, set, H}$);
- temperatura interna di regolazione per il raffrescamento ($\theta_{int, set, C}$);
- numero di ricambi d'aria (n);
- tipo di ventilazione (aerazione, ventilazione naturale, ventilazione artificiale);
- tipo di regolazione della portata di ventilazione (costante, variabile);
- durata del periodo di raffrescamento (N_C);
- durata del periodo di riscaldamento (N_H);
- regime di funzionamento dell'impianto di climatizzazione;
- modalità di gestione delle chiusure oscuranti;
- modalità di gestione delle schermature mobili;
- apporti di calore interni.

La trattazione critica che segue è impostata sul confronto tra i metodi semplificati per questo lavoro e il metodo analitico standardizzato, considerando i diversi dati di ingresso necessari ai calcoli. Per questa

prima parte di analisi si considera il dato risultante dalla simulazione analitica (metodo standardizzato) come quello più simile alla realtà e pertanto come dato di riferimento.

In questo paragrafo sono valutati gli elementi del calcolo che concorrono alla determinazione del coefficiente globale di scambio termico per trasmissione. Nei paragrafi 7.6 e 7.7 è preso in considerazione anche il calcolo del coefficiente globale di scambio termico per ventilazione. Questa suddivisione è data dal fatto che i metodi semplificati non fanno differenze, rispetto a quello standardizzato, nella definizione delle perdite per ventilazione. Sono però necessarie alcune osservazioni sul sistema di valutazione, anche per quanto riguarda il metodo analitico.

Pertanto, la critica è strutturata come segue:

1. caratterizzazione tipologica dell'edificio (*paragrafo 7.5.2.*);
2. coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione termica dei componenti di involucro:
 - a. descrizione del sistema tecnologico che costituisce l'involucro - componente opaca (*paragrafo 7.5.3.*);
 - b. descrizione del sistema tecnologico che costituisce l'involucro - componente trasparente (*paragrafo 7.5.4.*);
1. coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione degli scambi termici (*paragrafo 7.5.5.*):
 - a. Scambi termici il terreno;
 - b. Scambi termici con ambienti non climatizzati.

Alcuni dati hanno un peso maggiore nel determinare la differenza tra i risultati delle diverse simulazioni energetiche condotte sui casi studio. Pertanto, è stato analizzato in che modo tali caratteristiche vengano prese in esame dai diversi metodi di calcolo e in che modo abbiano influito sul risultato. Alla fine di ogni analisi è presentato un *Box – proposte di soluzioni* in cui sono indicate le indicazioni suggerite per diminuire lo scostamento tra il risultato del calcolo semplificato e quello analitico standardizzato.

7.5.2. Caratterizzazione tipologica dell'edificio

Dalla caratterizzazione tipologica e volumetrica dell'edificio dipende gran parte del calcolo per la stima delle sue prestazioni energetiche. Essa è fatta tramite la definizione di:

- a) Consistenza volumetrica dell'edificio:
 - volume lordo riscaldato (V_l);
 - volume interno (o netto) dell'ambiente climatizzato (V);

- superficie utile (o netta calpestabile) dell'ambiente climatizzato (A_t);
- superfici di tutti i componenti dell'involucro e della struttura edilizia (A);

b) Morfologia dell'edificio:

- orientamenti di tutti i componenti dell'involucro edilizio;
- caratteristiche geometriche di tutti gli elementi esterni (altri edifici, aggetti, ecc.) che ombreggiano i componenti opachi e trasparenti dell'involucro edilizio.

Il metodo standardizzato prevede di descrivere analiticamente tutti questi dati, secondo un rilievo preciso delle dimensioni e dello sviluppo del fabbricato. Per quanto riguarda il metodo semplificato UNI TS 11300 non prevede semplificazioni di questa parte del calcolo, per cui questa fase è la medesima. Il metodo *Docet*, invece, prevede di velocizzare il calcolo richiedendo al progettista solo alcune informazioni e facendo in automatico il calcolo delle quantità utili (*Figura 7.18*). Il programma richiede un solo dato corrispondente all'altezza interpiano, attraverso il quale viene fatto in automatico il calcolo del volume disperdente. In tutti i casi studio analizzati, gli edifici sono caratterizzati da una grande varietà di altezze interpiano differenti, che creano una volumetria molto articolata. Scegliendo un dato di altezza interpiano medio il risultato corrispondente al volume riscaldato è molto diverso dalla realtà.

Il sistema richiede, inoltre, l'impronta in pianta del piano tipo e il numero di piani dell'edificio. Anche in questo caso tutti gli edifici campione presentano un'articolazione planimetrica non facilmente semplificabile in questo modo. La presenza (per esempio in Palazzo Scacerni Sisti – zone termiche A e B o Palazzo Cicognara Sani – zone termiche F e G) di soppalchi e doppi volumi non è semplificabile come prevede il programma. Se si semplifica indicando l'impronta e l'altezza media del piano terra e indicando un solo piano, il volume riscaldato risulta inferiore a quello reale, mentre se si ipotizzano due piani esso risulta sovradimensionato. Un'alternativa è utilizzare l'impronta del piano terra e l'altezza massima dell'edificio (sommando piano terra e altezza del soppalco), anche se questa operazione risulta più corretta solo dove il soppalco occupa l'intera area dell'edificio (cosa assai poco frequente).

Come si vede in *tabella 7.15*, dove per semplificazione nella trattazione è riportato solo il valore corrispondente al volume lordo riscaldato, lo scostamento dal valore reale è molto rilevante. Non si può generalizzare dicendo che il metodo *Docet* sovrastimi o sottostimi sempre della stessa quantità percentuale il dato, perché, come si vede dagli esempi, i valori si spartiscono al 50% circa, tra positivi e negativi. La differenza è determinata dalla complessità dei singoli edifici e il problema non è assolutamente generalizzabile. Il programma di ausilio al metodo *Docet* permette di forzare la tabella di

riepilogo dati geometrici (Figura 7.18 - Riepilogo dati) immettendo quelli calcolati con un rilievo preciso dell'edificio.

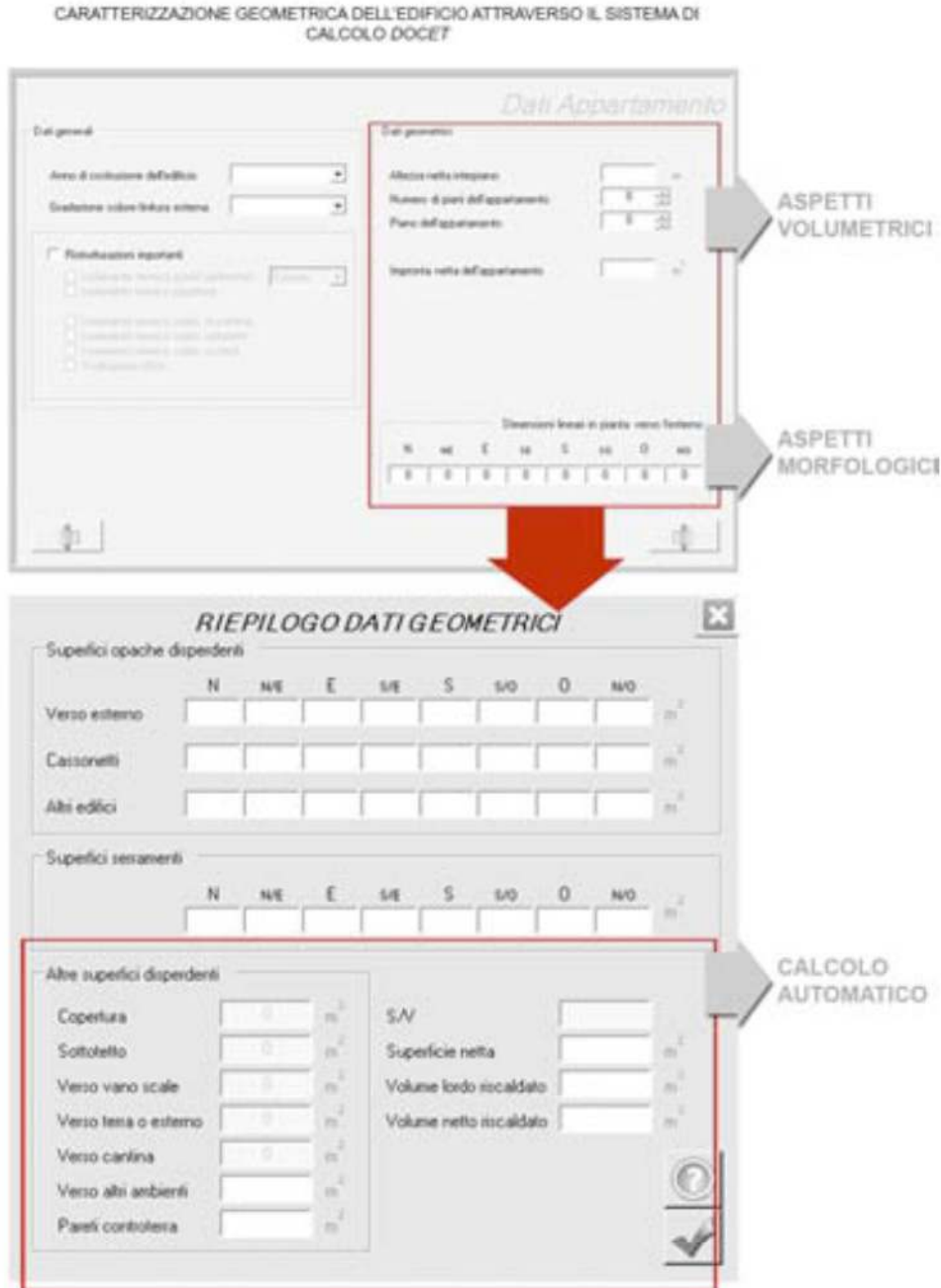


Figura 7.18. Schermata del software *Docet*, relativa alla definizione geometrica dell'edificio. Nella prima tabella l'utente deve compilare alcuni campi per fornire i dati di *input* per il calcolo dei dati geometrici fatto automaticamente dal software. Nella schermata successiva viene proposto un riepilogo dei dati in modo che l'utente possa verificarli e correggerli.

Si è valutata l'incidenza di questo fattore sui risultati delle simulazioni procedendo con i valori calcolati automaticamente e con quelli reali inseriti a mano. L'errore medio è del 20%. Pertanto, per le simulazioni dei casi studio condotte con questo metodo, si è sempre forzato il *software* per utilizzare i valori reali e non quelli calcolati automaticamente. Questo errore, infatti, avrebbe alterato sin dal principio le simulazioni, non permettendo di stimare con precisione l'influenza degli altri parametri sul calcolo.

Il valore di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p, inv}$) è sempre conservativo rispetto a quello analitico anche nei casi in cui i valori dimensionali calcolati con il metodo semplificato siano inferiori a quelli reali.

Casi studio	CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELL'EDIFICIO			
	Zone termiche	Volume lordo riscaldato reale (m ³)	Volume lordo riscaldato calcolato automaticamente con metodo <i>Docet</i> (m ³)	Scostamento tra i valori (colonna 4 rispetto a colonna 3) (%)
Palazzo Scacerni Sisti	A	616,9	662,4	+ 7,4
	B	752,5	731,9	- 2,7
	C	1186,9	1068	- 10
	D	1374,09	1187,5	- 13,6
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	9195,4	2996	- 67,4
Palazzo Cicognara Sani	A	417,7	411	- 1,6
	B	1789,5	1367,1	- 23,6
	C	1871,1	1448,9	- 22,6
	D	832	1128	+ 35,6
	E	683,7	984,7	+ 44
	F	238,8	268,5	+ 12,4
	G	861,2	1289,5	+ 49,7
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	6942,9	7172,3	+ 3,3
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	15159,3	11251,3	- 25,8

Tabella 7.15. Valori corrispondenti al volume lordo riscaldato, calcolato analiticamente (colonna 3) e calcolato automaticamente dal programma *Docet* in base ai dati di *input* richiesti (colonna 4). Come si vede in colonna 5 le variazioni possono essere anche molto elevate e pertanto possono influire sensibilmente sul risultato finale.

Box – proposte di soluzioni: CARATTERIZZAZIONE TIPOLOGICA

Metodo Docet: il calcolo automatico da parte del *software*, fatto sulla base di alcuni dati di *input*, provoca un errore del 20% sul risultato, per cui non può essere ritenuto valido.

> PROPOSTA:

rendere obbligatorio l'inserimento dei dati geometrici che descrivono l'edificio in base ad un rilievo dimensionale del fabbricato. Indicare manualmente il volume lordo disperdente, la superficie netta e lorda e l'estensione degli elementi oggetto dello scambio termico (verso esterno, verso terreno e verso altri ambienti non riscaldati)

Metodo semplificato UNITS11300: non prevede semplificazioni per cui relativamente a questa sezione è ritenuto valido.

7.5.3. Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione termica dei componenti di involucro - componente opaca

La principale difficoltà che si riscontra nella descrizione dell'edificio per la sua valutazione energetica è la descrizione del sistema tecnologico che costituisce l'involucro.

Secondo il corpo metodologico, la caratterizzazione termica dei componenti di involucro si suddivide in trasmittanza termica dei componenti *opachi* e *trasparenti*.

Componenti opachi

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_i}\right) + \left(\sum_i \frac{s}{\lambda}\right) + \left(\frac{1}{R_e}\right)} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (12)$$

Dove:

U = Trasmittanza termica

R_i = Resistenza superficiale interna

R_e = Resistenza superficiale esterna

s = spessore dello strato di materiale

λ = conduttività termica del materiale

Per il calcolo della trasmittanza termica dei componenti opachi, da indicazioni della normativa occorre che:

- le proprietà termo - fisiche dei materiali siano ricavate dai dati di accompagnamento della marcatura CE oppure dalla UNI 10351 o dalla UNI EN 1745;
- le resistenze termiche di murature e solai siano ricavate dai dati di accompagnamento della marcatura CE oppure dalla UNI 10351 o dalla UNI EN 1745;
- i coefficienti globali di scambio termico e le resistenze delle intercapedini d'aria siano conformi ai valori stabiliti dalla UNI EN ISO 6946.

La normativa prevede che in assenza di tali dati essi siano determinati in funzione della tipologia edilizia e del periodo di costruzione dell'edificio, secondo quanto indicato dalle appendici A e B della norma tecnica UNITS 11300 (A - *Determinazione semplificata della trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti*; B - *Abaco delle strutture murarie utilizzate in Italia in edifici esistenti*).

Come si vede in *tabella 7.16*, in ciascuno dei casi studio analizzati, si deve descrivere una varietà numerosa di elementi tecnologici, diversi per natura stratigrafica e per spessore. A ognuno di essi, ovviamente, corrisponde un valore di trasmittanza termica, che in molti casi varia in maniera significativa. Per il calcolo con metodo analitico standardizzato il valore di trasmittanza termica è stato calcolato a partire dai valori di conducibilità termica dei singoli materiali che compongono la stratigrafia del pacchetto, secondo le indicazioni della UNI EN ISO 6946. Le capacità termiche dei materiali non hanno la certificazione CE perché non si tratta di materiali nuovi, pertanto si è fatto riferimento ai valori indicati dalla UNI 10351 e dalla UNI EN 1745²².

Per condurre le simulazioni energetiche dei casi studio secondo i metodi semplificati si è, invece, fatto riferimento agli abachi tecnologici indicati dalla normativa.

In tutti i casi si sono scelte le seguenti strutture:

- chiusure e partizioni verticali: *muratura in mattoni pieni intonacata sulle due facce*;
- chiusure orizzontali inferiori (solai a terra): *basamento in calcestruzzo su terreno*. Negli abachi di strutture non sono previste soluzioni di solaio compatibili con la tradizione costruttiva antica - vespaio con allettamento in sabbia - ma la soluzione adottata è comunque accettabile in alcuni dei casi studio analizzati, dove i restauri hanno interessato anche il solaio a terra;
- chiusure orizzontali inferiori (solai verso esterno o spazi aperti o verso ambienti non climatizzati quali cantine e sottotetti): *soletta in laterocemento*.
Negli abachi di strutture pre-calcolate non sono previste soluzioni di solai lignei, che, invece, rappresentano la quasi totalità dei casi analizzati nel presente studio;
- coperture: *teito in legno* (coibentato o non).

²² Si rimanda al paragrafo 7.3.1 per i singoli valori di trasmittanza di tutte le componenti tecnologiche dei casi studio.

Casi studio	CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEI COMPONENTI OPACHI			
	Componenti tecnologiche	Numero di componenti tecnologiche diverse rilevate nell'edificio	Range valori trasmittanza termica (U) calcolati secondo UNI EN ISO 6946 espressi in W/m ² k	Range valori dimensionali pacchetti tecnologici espressi in cm (tra parentesi il valore medio)
Palazzo Scacerni Sisti	Chiusure verticali:	4	U = 0,899 ÷ 1,547	33 ÷ 65 (46)
	Partizioni verticali:	5	U = 0,998 ÷ 1,864	16 ÷ 52 (33)
	Chiusure orizzontali inferiori:	4	U = 0,486 ÷ 1,844	15 ÷ 65 (37)
	Chiusure superiori:	1	U = 0,453	-(*)
Complesso di S. Antonio in Polesine	Chiusure verticali:	3	U = 1,030 ÷ 1,699	29 ÷ 55 (42)
	Partizioni verticali:	3	U = 1,283 ÷ 1,849	16 ÷ 55 (33)
	Chiusure orizzontali inferiori:	2	U = 1,512 ÷ 1,122	28 ÷ 46 (37)
	Chiusure superiori:	1	U = 2,778	-(*)
Palazzo Cicognara Sani	Chiusure verticali:	4	U = 0,663 ÷ 1,641	31,5 ÷ 62 (45)
	Partizioni verticali:	3	U = 1,076 ÷ 2,608	11 ÷ 55 (33)
	Chiusure orizzontali inferiori:	2	U = 0,861 ÷ 1,120	12 ÷ 20 (16)
	Chiusure superiori:	1	U = 0,557	-(*)
Villa Molin Avezzù	Chiusure verticali:	4	U = 0,396 ÷ 0,621	47 ÷ 73 (58)
	Partizioni verticali:	4	U = 0,323 ÷ 1,703	15 ÷ 85 (50)
	Chiusure orizzontali inferiori:	1	U = 0,293	20
	Chiusure superiori:	1	U = 2,778	-(*)
Villa Barbaro Maser	Chiusure verticali:	2	U = 0,563 ÷ 0,794	40 ÷ 51 (45)
	Partizioni verticali:	3	U = 0,741 ÷ 1,082	20 ÷ 40 (30)
	Chiusure orizzontali inferiori:	1	U = 0,294	20
	Chiusure superiori:	1	U = 2,778	-(*)

(*) il valore dimensionale delle coperture non è segnato perché la scelta dall'abaco della trasmittanza termica di questa tipologia di pacchetto tecnologico non avviene in base alla dimensione ma solo ai materiali.

Tabella 7.16. Varietà di componenti tecnologici presenti in ciascuno dei casi studio. Per semplicità in questa tabella si sono riportati solo i *range* di trasmittanza termica per ciascun caso studio suddivisi in base alla tipologia di componente. È riportato il *range* di valori dimensionali perché la scelta del corrispondente valore di trasmittanza termica negli abachi normativi esistenti avviene attraverso lo spessore del componente. Si rimanda alle descrizioni dei singoli casi studio per una caratterizzazione più precisa.

Per la simulazione con metodo semplificato *Docet* la caratterizzazione dell'involucro, per quanto concerne la componente opaca, si può fare selezionando una sola tipologia di pacchetto tecnologico per descrivere tutte le chiusure verticali e orizzontali, dell'intero edificio.



Figura 7.19. L'immagine rappresenta la schermata del software *Docet*, relativa alla definizione dell'involucro opaco. Come si vede, il programma prevede di selezionare una sola tipologia di muratura fra sole tre possibili, in riferimento agli abachi contenuti nel prospetto A della UNI TS 11300.

Pertanto sono stati messi a confronto i valori di trasmittanza termica derivanti dal calcolo analitico, ottenuti secondo le indicazioni della UNI EN ISO 6946, e quelli corrispondenti alle soluzioni tecnologiche scelte a partire dagli abachi forniti per la semplificazione.

Casi studio	TRASMITTANZA TERMICA DEI COMPONENTI OPACHI – METODO <i>DOCET</i>				
	Zone termiche	Tipologia di chiusura più diffusa con relativo valore di trasmittanza termica espresso in W/m ² k (calcolato con metodo standardizzato)	Valore di trasmittanza termica ponderata (\bar{U}) espresso in W/m ² k	Trasmittanza termica (U) adottata per il metodo semplificato <i>Docet</i> (valori ricavati da appendici A e B UNI TS 11300)(***)	Scostamento % dal metodo di calcolo standardizzato /scostamento dal valore di trasmittanza ponderata (colonna 5 rispetto a colonna 3 e 4)
Palazzo Scacemi Sisti	A	CV3 (37 cm) = 1,436 COI4 (15 cm) = 1,542	$\bar{U} = 1,226$ $\bar{U} = 1,66$	U (sp. 30) = 1,77 U (sp. 20) = 2,00	+ 23 / 45 + 29 / 20
	B	CV4 (33 cm) = 1,547 COI2 (32 cm) = 1,844	- (**) - (**)	U (sp. 30) = 1,77 U (sp. 30) = 1,80	+ 15 -
	C	CV2 (50 cm) = 1,121 CS (21 cm) = 0,453	- (**) - (**)	U (sp. 45) = 1,25 U (sp. 20) = 0,8	+ 11 + 77
	D	CV2 (50 cm) = 1,121 COS (21 cm) = 0,453	- (**) - (**)	U (sp. 45) = 1,25 U (sp. 20) = 0,8	+ 11 + 77
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	CV3 (29 cm) = 1,699 COI1 (28 cm) = 1,512 CS (14 cm) = 2,778	$\bar{U} = 1,45$ $\bar{U} = 1,47$ -	U (sp. 30) = 1,77 U (sp. 30) = 1,80 U = 1,8	+ 4/22 + 18/24 - 35
Palazzo Cicognara Sani	A	CV3 (46 cm) = 1,222	$\bar{U} = 0,92$	U (sp. 45) = 1,25	+ 3 / 35
	B	CV3 (46 cm) = 1,222	$\bar{U} = 0,97$	U (sp. 45) = 1,25	+ 3 / 28
	C	CV3 (46 cm) = 1,222	$\bar{U} = 0,94$	U (sp. 45) = 1,25	+ 3 / 32
	D	CV3 (46 cm) = 1,222 CS (12 cm) = 0,557	$\bar{U} = 1,02$ -	U (sp. 45) = 1,25 U (sp. 20) = 0,8	+ 3 / 22 + 45
	E	CV3 (46 cm) = 1,222 COS (12 cm) = 0,557	- -	U (sp. 45) = 1,25 U (sp. 20) = 0,8	+ 3 + 45
	F	CV4(31,5 cm) = 1,641	$\bar{U} = 1,46$	U (sp. 30) = 1,77	+ 7 / 21
	G	CV4(31,5 cm) = 1,641 CS (12 cm) = 0,557	$\bar{U} = 1,59$ -	U (sp. 30) = 1,77 U = 0,8	+ 7 / 11 + 45
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	CV2(64 cm) = 0,435 COI(20cm) = 0,293 CS (12 cm) = 2,778	$\bar{U} = 0,442$ - -	U (sp. 60) = 1,04(****) U (sp. 30) = 1,80 U = 1,8	+ 140 / 136 + 514 -35
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	CV1(50 cm) = 0,563 COI(20cm) = 0,293 CS (12 cm) = 2,778	$\bar{U} = 0,664$ - -	U (sp. 45) = 1,25 U (sp. 30) = 1,80 U = 1,8	+122/88 + 514 - 35

(*) Il valore di trasmittanza ponderata è calcolato in base alla % di superficie di ogni tipologia di pacchetto e alla rispettiva trasmittanza.

(**) Quando c'è una sola tipologia di chiusura verticale la trasmittanza ponderata è uguale a quella calcolata analiticamente per la singola tipologia di chiusura e si omette.

(***) Tra parentesi è indicato lo spessore selezionato nell'abaco, più simile a quello della chiusura verticale reale, anche se non coincidente.

(****) Nell'abaco non c'è la muratura a sacco. La trasmittanza più simile a quella analitica è *Muratura in mattoni semipieni o tufo* (U=0,90 W/m²k).

Tabella 7.17. Valori per il calcolo della trasmittanza termica dei componenti opachi con il metodo *Docet*.²³

²³ Indicazione di carattere generale: i casi studio sono sempre suddivisi nelle rispettive zone termiche perché le simulazioni energetiche sono state fatte separatamente per ciascuna di esse, in tutti i casi in cui ci fossero sistemi di generazione di calore separati.

La *tabella 7.17* riporta il confronto tra la caratterizzazione termica dell'involucro (per quanto concerne la componente opaca) condotta con metodo analitico e con metodo semplificato *Docet*.

Dal momento che il metodo semplificato *Docet* permette di selezionare una *sola* tipologia di chiusura (così come per gli altri pacchetti tecnologici, ad esempio partizioni interne verticali e orizzontali), sono state scelte, per ciascuna zona termica, le più diffuse, per confrontare un solo valore calcolato analiticamente con un solo valore corrispondente alla tipologia scelta nella simulazione *Docet*. Questa scelta, al momento della simulazione, è stata fatta per tutte le tipologie di pacchetti, ma per semplificazione nella trattazione, nella tabella sono state riportate solo le chiusure (e non le partizioni), perché esse influiscono maggiormente sul risultato finale, e sono quindi più interessanti ai fini della critica.

Per l'analisi è stato calcolato anche un valore di *trasmissione ponderata*, per poter rappresentare il comportamento termico dell'involucro attraverso un solo valore e confrontarlo con quello selezionato nel metodo *Docet*. Pertanto, invece di utilizzare per il confronto solo il valore più frequente si è confrontato il dato usato nel metodo *Docet* anche con il valore di trasmissione ponderata, calcolata in base all'estensione superficiale nell'edificio e in base all'influenza di ciascuna chiusura (caratterizzata da una propria stratigrafia e un proprio spessore). Questo valore descrive in maniera senz'altro più simile alla realtà, il comportamento termico dell'involucro complessivo dell'edificio.

In *tabella 7.17* sono indicati il valore di trasmissione termica corrispondente alla tipologia di chiusura più frequente (colonna 3), calcolato secondo il metodo analitico standardizzato (UNI EN ISO 6946), il valore di trasmissione termica ponderato (colonna 4), in base a tutte le tipologie di pacchetto tecnologico presenti nella zona termica (e quindi nell'edificio) e il valore di trasmissione termica riferito alla tipologia di pacchetto tecnologico selezionata per il metodo *Docet* (colonna 5).

Il valore di trasmissione selezionato nel metodo *Docet* corrisponde ai valori tabulati nelle Appendici A e B della UNI TS 11300-1, con una ulteriore semplificazione, data dalla possibilità di scegliere tra soli tre spessori di muratura (30, 45 e 60 cm)²⁴. Pertanto, al momento della simulazione sono stati selezionati i valori riportati in tabella relativamente allo spessore, tra i tre, più vicino a quello reale.

Come si vede dalla tabella, la trasmissione termica delle chiusure verticali selezionate nel metodo *Docet* è sempre conservativa, sia rispetto al valore più diffuso, calcolato con il metodo standardizzato, con uno **scostamento medio del 25%**, sia rispetto al valore ponderato calcolato con metodo standardizzato, con uno **scostamento medio del 40%**. Così come per le chiusure verticali, anche per le chiusure orizzontali inferiori (solai a terra), il metodo semplificato *Docet* è sempre conservativo perché sovrastima il valore del 20% circa, escludendo i casi studio di Villa Molin Avezzù e Barbaro Maser dove lo scostamento supera

²⁴ Gli abachi normativi originali, invece, permettono la scelta tra 10 diversi spessori di muratura.

addirittura il 500%, rispetto al metodo standardizzato.

L'analisi della caratterizzazione termica delle coperture è più complessa perché, per questo elemento tecnologico, la normativa fa riferimento solo a *Tetto in legno* senza specificare gli spessori nel caso in cui la copertura non sia isolata. Anche se le soluzioni rilevate nei casi studio analizzati sono molto diverse tra loro si può generalizzare dicendo che, nei casi in cui la struttura si presenti allo stato originale, il metodo semplificato sottostima del 35% circa il valore di trasmittanza. Nei casi in cui la copertura abbia subito dei restauri e quindi oggi presenti uno strato di coibentazione (per esempio i casi di Palazzo Scacerni Sisti e Cicognara Sani) il valore finale di trasmittanza termica è sovrastimato di circa il 45%. Questo perché il valore di trasmittanza corrispondente ad una copertura coibentata di nuova o recente costruzione prevede l'inserimento di spessori isolanti molto maggiori rispetto a quelli, generalmente, consentiti nel restauro di una copertura storica. In molti casi, infatti, l'intervento è limitato all'aggiunta di sottili strati di materiale coibente che permettono di aumentare la *performance* energetica del componente senza alzare il livello di gronda esterno, di norma oggetto di vincolo.

Dall'indagine relativa alla caratterizzazione dei componenti opachi con il metodo *Docet* risulta, quindi, che la numerosa varietà di pacchetti tecnologici che descrivono l'involucro dei casi studio è limitata alla scelta obbligata di un solo tipo che definisca l'intero complesso edilizio. Questa prima limitazione costringe ad adottare un valore di trasmittanza termica dettato dalla tipologia più frequente e in base ad un valore di spessore medio. E' stato "creato", infatti, per ciascun caso studio, un pacchetto tecnologico *tipo* dato dalla stratificazione materica più frequente – tra quelle selezionabili dall'abaco - e con un spessore medio tra tutti quelli presenti. Nell'edilizia storica, però, come si vede nei casi studio simulati, si hanno molteplici possibilità di variazione. A costituire l'involucro esterno di uno stesso edificio, possono esserci murature con presenza o meno di intonaco superficiale, oppure stratificazioni edilizie date dalla compresenza di parti di edifici risalenti a periodi costruttivi successivi e quindi realizzate con materiali dissimili, come laterizi di provenienza geografica differente o realizzati con metodi di cottura diversi, se non addirittura parti in laterizio e parti in pietra. Nelle chiusure orizzontali, possono esserci controsoffitti o volte, in molti casi presenti solo nelle stanze di pregio ai piani nobili a seconda dell'importanza dell'ambiente.

La varietà dei pacchetti tecnologici dipende fortemente anche dallo spessore delle murature. Come si vede negli esempi riportati, in uno stesso edificio si hanno molte murature con le medesime caratteristiche materiche ma con spessori che variano molto (dell'ordine anche di 20 cm) a seconda del prospetto.

La possibilità di caratterizzare l'involucro edilizio con un solo tipo di struttura per tipologia appare, pertanto, molto riduttivo. Questo aspetto influisce in particolare per quanto riguarda la caratterizzazione degli scambi termici con ambienti a temperatura diversa, trattati nel *paragrafo 7.5.5*.

Un altro importante aspetto che emerge dall'applicazione del metodo agli edifici campione è che il valore di trasmittanza termica selezionato non corrisponde a quello calcolato analiticamente. In particolare, lo scostamento tra i risultati diventa notevole se si fa riferimento al valore ponderato invece che alla trasmittanza termica del pacchetto più frequente. La differenza aumenta perché il valore ponderato è minore rispetto alla trasmittanza del componente tecnologico più diffuso. Questo significa che l'influenza data dalla molteplicità di tipologie di pacchetti tecnologici influisce positivamente sulla qualità termica dell'involucro preso complessivamente. Selezionare una sola tipologia caratterizza negativamente il comportamento energetico dell'involucro. Questa è una prima spiegazione, e quindi una delle cause, anche se non l'unica, dello scostamento tra il risultato di $E_{p_i, inv}$ ottenuto con il metodo analitico standardizzato e quello semplificato *Docet*.

Il programma *Docet* permette di forzare il valore di trasmittanza termica per riportare il dato calcolato analiticamente e non frutto della selezione dagli abachi. Se si sostituiscono i valori di trasmittanza termica preconfezionati con quelli calcolati analiticamente usando il pacchetto più frequente l'indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p_i, inv}$) varia sensibilmente, diminuendo di circa il 7%, mentre il miglioramento aumenta se si usa il valore di trasmittanza termica ponderato (in media lo scostamento scende del 15%).

In *figura 7.20* si vede che, usando il valore di trasmittanza ponderato il risultato migliora considerevolmente e lo scostamento tra l'indice di prestazione energetica per l'involucro ottenuto con il metodo *Docet* presenta uno scostamento del 20% rispetto all'analitico, mentre senza questa variazione lo scostamento è del 40% (*figura 7.15*).

Casi studio	INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO – METODO <i>DOCET</i>					
	Zone termiche	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p,inv}$), calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i> (kWh/m ² a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p,inv}$), calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i> , forzando il valore di trasmittanza termica (kWh/m ² a)	Scostamento tra i risultati % (colonna 4 rispetto a colonna 3)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p,inv}$), calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i> , forzando il valore di trasmittanza termica (trasmittanza ponderata) (kWh/m ² a)	Scostamento tra i risultati % (colonna 6 rispetto a colonna 3)
Palazzo Scacerni Sisti	A	254,8	217,1	- 14,8	150,4	- 41
	B	326,5	308,6	- 5,4	- (*)	-
	C	283,8	276,1	- 2,7	- (*)	-
	D	375,1	260,5	- 30,5	- (*)	-
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	571,9	560,5	- 1,9	526,6	- 7,9
Palazzo Cicognara Sani	A	152,2	150,4	- 1,2	132,2	- 13,1
	B	113,8	112,1	- 1,5	97,5	- 14,3
	C	92,7	91,4	- 1,4	79,1	- 14,7
	D	211,5	208,4	- 1,5	187,9	- 11,2
	E	224,8	221,5	- 1,5	- (*)	-
	F	251,6	238,9	- 5,0	221,4	- 12
	G	369,9	360,1	- 2,6	347,5	- 6,1
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	207,3(**)	150,2	- 27,5	150,9	- 27,2
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	172,1	140,6	- 18,3	145,2	- 15

(*) In alcune zone termiche degli edifici campione l'involucro è caratterizzabile con una sola tipologia di pacchetto tecnologico (sempre in riferimento soltanto alle chiusure verticali), pertanto l'indice di prestazione energetica non cambia rispetto a quello ottenuto usando la tipologia più frequente.

(**) Gli abachi di riferimento del metodo *Docet* non contemplano la muratura a sacco. Il valore di trasmittanza termica dell'abaco più simile a quello calcolato analiticamente corrisponde alla *Muratura in mattoni semipieni o tufo* ($U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$). La variazione data dall'uso di questa trasmittanza termica alternativa corrisponde a un valore di $E_{p,inv}$ di 194,1 kWh/m²a.

Tabella 7.18. Sintesi del confronto tra i dati di prestazione energetica per l'involucro calcolati con il metodo semplificato *Docet*.

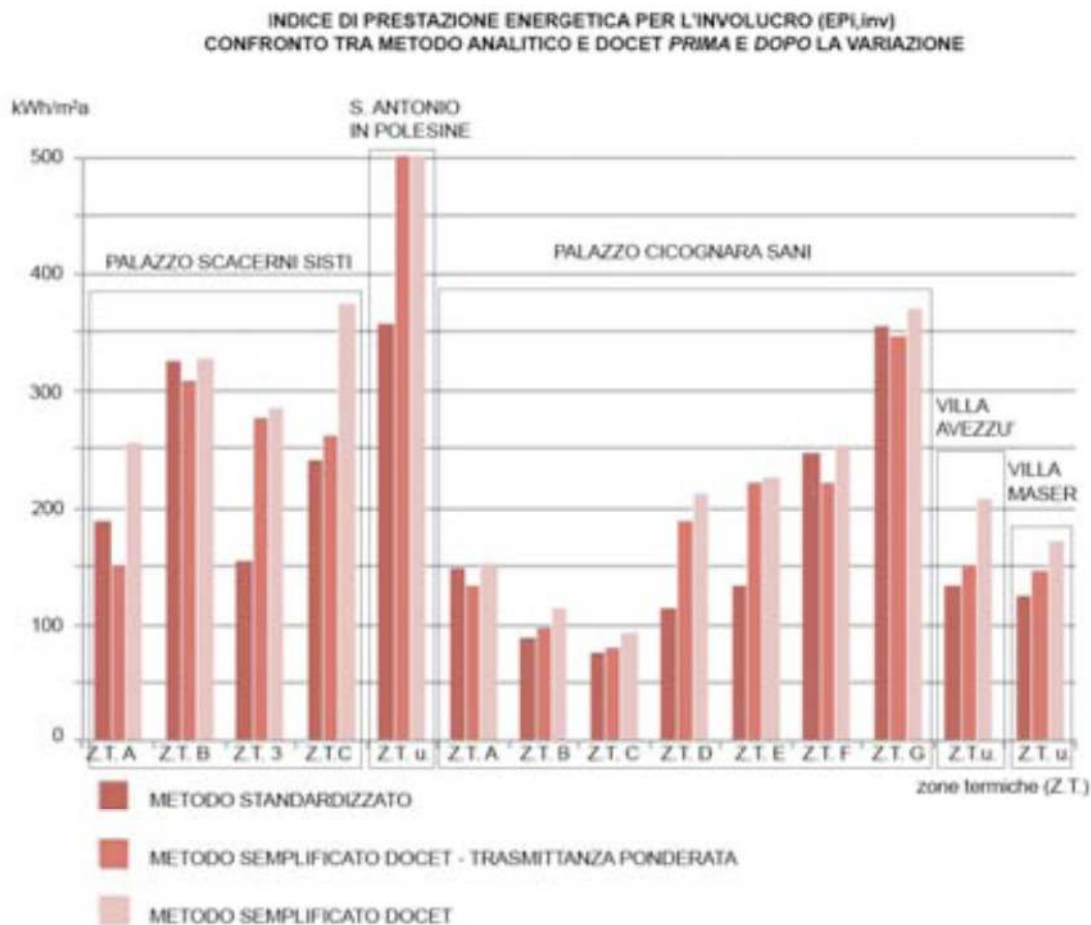


Figura 7.20. Indice di prestazione energetica calcolato con metodo Docet base e con la forzatura del valore di trasmittanza ponderata rispetto al metodo analitico standardizzato.

Il metodo semplificato UNI TS 11300 permette di caratterizzare l'involucro attraverso abachi tecnologici con una maggiore possibilità di scelta rispetto al metodo *Docet*. In questo modo, il calcolo è semplificato, ma consente di descrivere l'edificio con il numero esatto di tipologie di involucro che presenta. La semplificazione resta relativamente alla caratterizzazione materica del pacchetto tecnologico e al range di spessori (che è comunque molto più preciso di quello *Docet*).

Nella *tabella 7.19* sono riportate le scelte effettuate per le simulazioni con il metodo semplificato UNI TS 11300-1.

TRASMITTANZA TERMICA DEI COMPONENTI OPACHI – METODO SEMPLIFICATO UNI TS 11300				
Caso studio	Componente tecnologica (classificazione secondo UNI 8290-1:1981)	Valore di trasmittanza termica (U) calcolato secondo la UNI EN ISO 6946, espresso in W/m ² k	Valore di trasmittanza termica (U) adottata per il metodo semplificato (valori ricavati da appendici A e B UNI TS 11300)	Scostamento tra i risultati %
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3	COLONNA 4	
Palazzo Scacerni Sisti	CV1 (65 cm)	0,899	1,04 (60 cm) PROSPETTO A.1	+ 15,7
	CV2 (50 cm)	1,121	1,14 (50 cm) PROSPETTO A.1	+ 1,7
	CV3 (37 cm)	1,436	1,56 (35 cm) PROSPETTO A.1	+ 8,6
	CV4 (33 cm)	1,547	1,56 (35 cm) PROSPETTO A.1	+ 0,8
	PV1* (52 cm)	0,998	0,88 (30 cm) PROSPETTO A.3	- 11,8
	PV2 (16 cm)	1,786	1,65 (15 cm) PROSPETTO A.3	- 7,6
	PV3 (20 cm)	1,864	1,35 (20 cm) PROSPETTO A.3	- 27,6
	PV4 (41 cm)	1,195	0,88 (35 cm) PROSPETTO A.3	- 26,4
	PV5 (37 cm)	1,272	0,88 (35 cm) PROSPETTO A.1	- 30,8
	COI1 (65 cm)	1,529	1,50 (30 cm) PROSPETTO A.6	- 1,9
	COI2 (32 cm)	1,844	1,30 (30 cm) PROSPETTO A.6	- 29,5
	COI4 (15 cm)	1,542	1,30 (30 cm) PROSPETTO A.5	- 15,7
	CS (21 cm)	0,453	0,74 PROSPETTO A.7	+ 63,4
Complesso di S. Antonio in Polesine	CV1 (55 cm)	1,030	1,07 (55 cm) PROSPETTO A.1	+ 3,9
	CV2 (42 cm)	1,283	1,39 (40 cm) PROSPETTO A.1	+ 8,3
	CV3 (29 cm)	1,699	1,77 (30 cm) PROSPETTO A.1	+ 4,2
	PV1 (55 cm)	1,283	0,88 (35 cm) PROSPETTO A.3	- 31,4
	PV2 (29 cm)	1,699	1,00 (30 cm) PROSPETTO A.3	- 41,1
	PV3 (16 cm)	1,849	1,65 (15 cm) PROSPETTO A.3	- 10,8
	COI1hp* (28 cm)	1,512	1,65 (30 cm) PROSPETTO A.6	+ 9,1
	COI2 (46 cm)	1,122	1,5 (30 cm) PROSPETTO A.4	+ 33,7
	CS (14 cm)	2,778	1,8 PROSPETTO A.7	- 35,2
Palazzo Cicognara Sani	CV1 (42 cm)	0,796	1,10 (40 cm) PROSPETTO A.7	+ 38,2
	CV2 (62 cm)	0,663	1,10 (40 cm) PROSPETTO A.7	+ 65,9
	CV3 (46 cm)	1,222	1,25 (45 cm) PROSPETTO A.1	+ 2,3
	CV4 (31,5 cm)	1,641	1,77 (30 cm) PROSPETTO A.1	+ 7,9
	PV1 (55 cm)	1,076	0,88 (30 cm) PROSPETTO A.3	- 18,2
	PV2 (33 cm)	1,388	0,88 (30 cm) PROSPETTO A.3	- 36,6
	PV3 (11 cm)	2,608	1,65 (15 cm) PROSPETTO A.3	- 36,6
	CS (12 cm)	0,557	1,8 PROSPETTO A.7	223,2
Villa Molin Avezzù	CV1 (73 cm)	0,396	1,04 (60 cm) PROSPETTO A.1	+ 162,6
	CV2 (64 cm)	0,435	1,04 (60 cm) PROSPETTO A.1	+ 139,1
	CV3 (51 cm)	0,563	1,14 (50 cm) PROSPETTO A.1	+ 102,5
	CV4 (47 cm)	0,62	1,25 (45 cm) PROSPETTO A.1	+ 101,6
	PV1 (47 cm)	0,587	1,37 (35 cm) PROSPETTO A.3	+ 133,4
	PV2 (15 cm)	1,703	1,65 (15 cm) PROSPETTO A.3	- 3,1

 Marta Calzolari, *Valutazione del comportamento energetico dell'architettura storica.*
Analisi dei metodi di calcolo dello stato di fatto energetico e proposte correttive.

Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura ICAR/12, XXV ciclo, Università degli Studi di Ferrara, 2010-2012

	PV3 (85 cm)	0,323	1,37 (35 cm) PROSPETTO A.3	+ 324,1
	COI1 (20 cm)	0,293	2,00 (20 cm) PROSPETTO A.6	+ 582,6
	CS (12 cm)	2,778	1,8 PROSPETTO A.7	- 35,2
Villa Barbaro Maser	CV1 (51 cm)	0,563	1,14 (60 cm) PROSPETTO A.1	+ 102,5
	CV2 (40 cm)	0,794	1,39 (40 cm) PROSPETTO A.1	+ 75,1
	PV1 (40 cm)	0,741	1,37 (35 cm) PROSPETTO A.3	+ 84,9
	PV2 (30 cm)	0,921	1,53 (30 cm) PROSPETTO A.3	+ 66,1
	PV3 (20 cm)	1,08	1,89 (30 cm) PROSPETTO A.3	+ 75
	COI1 (20 cm)	0,294	2,00 (20 cm) PROSPETTO A.6	+ 580,3
	CS (12 cm)	2,778	1,8 PROSPETTO A.7	- 35,2

Tabella 7.19. Valori di trasmittanza termica calcolati secondo la UNI EN ISO 6946 (metodo analitico) a confronto con quelli ricavabili dagli abachi preesistenti, caratterizzabili per ogni tipologia di chiusura presente nell'edificio e limitatamente ad un *range* di spessori.

Come si vede in tabella, la caratterizzazione dell'involucro è molto più precisa che con il metodo *Docet*, e si avvicina molto al valore ottenuto usando, *in Docet*, il valore di trasmittanza ponderato, dal momento che vengono utilizzate tutte le varietà di pacchetti tecnologici. Come si vede, però, anche se la caratterizzazione è più precisa, non sempre si ottiene un valore di trasmittanza esatto. Nel caso del metodo semplificato UNITS11300 la differenza tra i valori è in media del 14%, per le chiusure verticali, escludendo i valori relativi a Villa Molin Avezù e Villa Barbaro Maser, per le quali la differenza dei valori è molto elevata (paragonabile a quella riscontrata nel metodo *Docet*, circa il 140%).

Le partizioni interne sono in gran parte sottostimate perché negli abachi di riferimento della UNI TS 11300 lo spessore massimo selezionabile è 30 cm, mentre in molti dei casi studio analizzati si ritrovano murature interne con spessori molto elevati. In questo caso il metodo semplificato sottostima la trasmittanza del 25%. Nei casi di Villa Molin Avezù e Villa Barbaro Maser lo scostamento aumenta perché gli edifici presentano partizioni interne di 80 cm di spessore. Queste differenze non influiscono in maniera importante sul risultato finale perché lo scambio termico fra ambienti interni alla stessa temperatura non modifica la prestazione termica complessiva dell'edificio. La presenza di masse murarie così elevate è più importante nel calcolo della capacità termica degli elementi edilizi, che si può stimare solo con un calcolo dinamico della prestazione energetica²⁵. La trasmittanza termica dei solai a terra è sovrastimata del 8%, mentre quella delle coperture è sottostimata del 10% circa. In questo caso non è possibile stimare, con gli strumenti a disposizione, un possibile miglioramento per questo sistema di calcolo perché l'errore è intrinseco agli abachi tecnologici di riferimento, che non sono stati ottenuti rilevando la prestazione

²⁵ Si rimanda al paragrafo 7.6.

energetica di strutture edilizie antiche, pertanto non corrispondono alle situazioni che si presentano nella simulazione energetica di questa tipologia edilizia.

Box – proposte di soluzioni: CARATTERIZZAZIONE TERMICA – COMPONENTI OPOCHE

Metodo Docet:

- la possibilità di caratterizzare termicamente l'edificio attraverso una sola tipologia di involucro appare limitativa per edifici storici che presentano una grande quantità di componenti tecnologiche.
- La trasmittanza termica delle chiusure verticali selezionabili dall'abaco si discosta da quella calcolata analiticamente di circa il 20%, se si considera il valore più diffuso e del 40% circa se si considera il valore analitico ponderato. La trasmittanza termica dei solai a terra è sovrastimata del 20% mentre nel caso di chiusure superiori isolate e non, le differenze tra analitico e semplificato sono dell'ordine del 35% e 45%. Queste differenze non sono accettabili e sono la causa prevalente dello scostamento tra i risultati dell'indice di prestazione energetica.

> PROPOSTA:

- per mantenere la semplificazione usando un solo valore di trasmittanza termica per ciascuna categoria di componente tecnologica si propone di rendere obbligatoria la forzatura del programma e inserire il valore di *trasmittanza termica ponderata*, calcolato analiticamente. In questo modo lo scostamento tra i risultati passa dal 40% al 20% circa (in alcuni casi il risultato rimane conservativo del 20% in altri è inferiore del 20%²⁶);
- ampliare gli abachi normativi con elementi tecnologici tipici dell'edilizia storica, la cui trasmittanza termica sia ottenuta attraverso il rilievo in loco di un vasto numero di componenti tecnologiche campione. È necessario creare abachi specifici per l'edilizia storica.

²⁶ Questo aspetto dipende dalla caratterizzazione degli scambi termici tra ambiente riscaldato e ambienti non riscaldati, come si vedrà nel paragrafo 7.5.5. Forzando solo il valore relativo alla trasmittanza termica dell'involucro (caratterizzazione degli scambi termici con l'esterno) lo scostamento del risultato finale resta influenzato solo dalla valutazione degli scambi termici con gli ambienti non riscaldati, che in media sono sottostimati. Questo spiega perché in alcuni casi il risultato finale di prestazione energetica sia inferiore nel metodo semplificato rispetto a quello analitico.

Metodo semplificato UNITS11300:

- le semplificazioni sono limitate alla scelta della tipologia di pacchetto tecnologico e non al numero di componenti presenti nell'edificio.
- La trasmittanza termica degli elementi tecnologici selezionabili dall'abaco si discosta da quella calcolata analiticamente di circa il 20%. Questa differenza è molto grande e influisce sul calcolo finale.

> PROPOSTA:

ampliare gli abachi normativi con elementi tecnologici tipici dell'edilizia storica, la cui trasmittanza termica sia ottenuta attraverso il rilievo in loco di un vasto numero di componenti tecnologiche campione. È necessario creare abachi specifici per l'edilizia storica.

Per quanto riguarda le chiusure verticali, i valori corrispondenti a *Muratura in mattoni pieni intonacati sulle due facce*, nei casi in cui effettivamente l'edificio presenti un involucro di questo tipo, sono i più corretti, perché gli spessori selezionabili dall'abaco sono abbastanza numerosi da coprire molte situazioni diverse. I valori di trasmittanza termica hanno variazioni comunque fino al 10%. Non sono corrispondenti ai valori calcolati analiticamente i pacchetti relativi a *Muratura in pietrame e tufo*, mentre è necessario creare abachi specifici per la muratura a sacco (al momento non esistenti).

7.5.4. Caratterizzazione termica dei componenti di involucro - componente trasparente

La trasmittanza termica delle finestre si calcola secondo la UNI EN ISO 10077-1. In caso di finestra singola la trasmittanza termica deve essere calcolata utilizzando l'equazione:

$$U_w = \frac{\sum A_g \times U_g + \sum A_f \times U_f + \sum l_g \times \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (13)$$

Dove:

U_g è la trasmittanza termica della vetrata;

U_f è la trasmittanza termica del telaio;

Ψ_g è la trasmittanza termica lineare dovuta agli effetti termici combinati della vetrata, del distanziatore e del telaio;

A_g è l'area della vetrata;

l_g è il perimetro totale della vetrata.

Nelle simulazioni con metodo analitico standardizzato sono state seguite queste indicazioni per il calcolo delle trasmittanze termiche dei componenti trasparenti dei casi studio.

La normativa prevede che in mancanza di dati di progetto attendibili o di informazioni dettagliate, i valori di trasmittanza termica delle vetrate e dei telai possano essere ricavate da abachi di strutture di riferimento, come indicato nell'Appendice C (prospetti C.1 – C.4) della UNI TS 11300. Per questo, nelle simulazioni condotte con i metodi semplificati si è fatto riferimento a queste tabelle per la semplificazione.

In generale, i valori di trasmittanza termica selezionati dagli abachi non si discostano molto dai valori calcolati analiticamente, perché gli infissi dei casi studio selezionati sono stati sostituiti e presentano, nella maggior parte dei casi, caratteristiche tecnologiche simili a quelle dei casi tabulati. Nel caso studio di Palazzo Cicognara Sani, gli infissi originali non sono stati sostituiti ma è stata aggiunta una seconda finestra nuova, a creare un sistema di *finestra doppia*. Questa soluzione è vantaggiosa da un punto di vista termico. Il comportamento energetico della componente *finestra doppia*, infatti, considera, oltre alla trasmittanza termica delle due finestre che compongono il sistema, la resistenza termica dell'intercapedine d'aria, secondo l'equazione:

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_{w1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (14)$$

Dove:

U_{w1} e U_{w2} sono le trasmittanze termiche delle due finestre;

R_{si} e R_{se} le resistenze superficiali interna e esterna;

R_s è la resistenza termica dell'intercapedine d'aria tra le vetrate delle due finestre.

La componente *finestra doppia*, però, non si può descrivere con il metodo semplificato *Docet*. Questa carenza, nel caso dell'applicazione del metodo al caso studio storico, rappresenta una limitazione, perché in numerosi edifici antichi si hanno doppie finestre.

Nel caso di S. Antonio in Polesine gli infissi non ci sono più, pertanto l'ipotesi necessaria per fare il calcolo della prestazione energetica ha supposto la presenza di infissi di recente costruzione (simili, nel comportamento termico, alle soluzioni tabulate).

Nei casi studio di Villa Molin Avezzù e Villa Barbaro Maser i valori di trasmittanza termica dei serramenti, ottenuti con il metodo standardizzato e il metodo semplificato *Docet*, si discostano maggiormente rispetto agli altri edifici. La trasmittanza dei serramenti secondo metodo analitico standardizzato è $3,5 \text{ Wm}^2\text{k}$, mentre con *Docet* è $4,9 \text{ Wm}^2\text{k}$. In questo caso gli infissi sono quelli originali (o di epoca di poco successiva) e la loro caratterizzazione è più difficile che per quelli recenti (di cui si hanno dati certificati). Come per la trasmittanza termica dei componenti opachi, anche in questo caso il valore semplificato è conservativo rispetto a quello standardizzato.

Un'ulteriore limitazione del metodo semplificato *Docet* è data dal fatto che non è possibile descrivere i *lucernai* o gli *abbaini*. In mancanza di questa possibilità, sarebbe possibile calcolarli tra i componenti opachi, considerandoli una variazione tipologica del pacchetto di copertura, ma come si è visto, il metodo non permette di descrivere l'involucro con più di una componente tecnologica. La caratterizzazione termica dei lucernai e degli abbaini cambia rispetto alle finestre tradizionali perché cambiano i valori di resistenza superficiale (che sono quelli di un elemento inclinato e non di uno verticale). Negli interventi di restauro o riqualificazione di edifici antichi è pratica diffusa aprire finestre in copertura, per aumentare l'illuminazione in caso di aperture originali troppo ridotte per gli *standard* odierni di *comfort* interno, o per l'utilizzo a scopo abitativo dei sottotetti. Pertanto è un elemento molto diffuso e da tenere presente nel calcolo della prestazione energetica.

La caratterizzazione della *componente trasparente* è completa solo se si prende in considerazione anche il sistema oscurante, come indicato nella UNI TS 11300-1 al *paragrafo 11.1.2 Componenti trasparenti*. La presenza di elementi esterni alla finestra con funzione oscurante ha un effetto migliorativo sulla trasmittanza dell'elemento finestra perché funge da isolamento notturno (il periodo della giornata, infatti, in cui lo scambio termico con l'esterno è generalmente più sfavorevole nella stagione invernale). La normativa indica come calcolare la *trasmittanza termica corretta*. Come accade per gli altri elementi costituenti l'involucro è possibile rifarsi alle tabelle contenute nella normativa, in caso di assenza di dati di progetto o informazioni attendibili. Per quanto riguarda la caratterizzazione degli elementi oscuranti si è fatto riferimento ai valori tabulati anche per il calcolo della prestazione energetica condotto con metodo analitico standardizzato. Infatti, non è possibile conoscere il reale comportamento degli elementi oscuranti presenti negli edifici scelti come casi studio, in assenza di un rilievo energetico diretto. Nei casi in cui è presente, l'elemento oscurante è di legno (persiane a lamelle o piene) o in tessuto. Nei casi di chiusure in legno si è fatto riferimento al prospetto C.4 della UNI TS 11300-1: *Chiusure in legno da 25 mm a 30 mm di spessore*, scegliendo a seconda dei casi il valore corrispondente alla permeabilità dell'aria (se a lamelle: *media permeabilità*). La normativa prevede la presenza di sistemi oscuranti in tessuto (UNI TS 11300-1 prospetto 14) ma possono essere prese in considerazione nel calcolo con metodo standardizzato solo se

sono *permanenti*, integrate cioè nell'involucro edilizio e non liberamente montabili o smontabili dall'utente e nel calcolo non sono state considerate. Questo sistema di oscuramento, però, è molto frequente negli edifici storici (si pensi per esempio alle tende rosse tipiche della tradizione architettonica dell'area ferrarese o dei casi in cui non si possano utilizzare elementi esterni sulle facciate) e in alcuni casi è l'unica possibilità permessa dalle Soprintendenze. Sia in Palazzo Scacerni Sisti, sia in Palazzo Cicognara Sani sono presenti sistemi di oscuramento in tessuto.

L'approssimazione, necessaria per la descrizione delle schermature anche nelle simulazioni analitiche, è ancora maggiore quando si utilizzano i metodi semplificati. Il metodo *Docet* non permette di selezionare la tipologia oscurante *in legno*, ma soltanto il tipo di avvolgibile. E' come se il sistema finestra non avesse la chiusura esterna. Questo significa che non si ha il beneficio isolante notturno. La descrizione corretta del sistema oscurante non cambia di molto il risultato finale, (anche se negli edifici con molte aperture come S. Antonio la differenza è più sensibile) ma è un altro elemento che contribuisce a ottenere un valore di prestazione energetica $E_{p,inv}$ peggiore rispetto alla situazione reale.

Box – proposte di soluzioni: CARATTERIZZAZIONE TERMICA – COMPONENTI TRASPARENTI

Metodo *Docet* e Metodo semplificato UNITS 11300:

Avendo utilizzato anche per le simulazioni con metodo standardizzato i valori tabulati da normativa, lo scostamento tra i risultati finali di prestazione energetica per quanto riguarda la caratterizzazione termica dei componenti trasparenti non emerge come per gli altri casi. Una valutazione scorretta anche di questo elemento, però, può influire molto (si rimanda all'analisi sul metodo analitico standardizzato, paragrafo 7.7). Si propone una soluzione valida per entrambi i sistemi di calcolo semplificato.

> PROPOSTA:

ampliare l'abaco di strutture fornite dalla normativa, con simulazioni sul campo che rilevino il comportamento energetico di serramenti storici. Il rilievo deve coinvolgere l'intera componente finestra (serramento e sistema di oscuramento) fornendo valori di trasmittanza termica tipici di un elemento storico.

7.5.5. Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione degli scambi termici

Dopo gli scambi termici con l'esterno, il dato che maggiormente influisce sul calcolo della prestazione energetica degli edifici è quello relativo agli scambi termici con spazi a temperatura diversa:

- trasmissione verso il terreno (H_g);
- trasmissione con ambienti non climatizzati (H_u).

In *tabella 7.20* sono riportati sinteticamente i risultati delle simulazioni relativi agli scambi termici. In media, nei casi studio simulati, il flusso di calore disperso attraverso ambienti non climatizzati è circa il 20% del totale, mentre lo scambio con il terreno è circa il 10%.

Caso studio	SCAMBI TERMICI					Incidenza delle dispersioni per scambio termico con ambienti non climatizzati rispetto al totale %
	Flusso termico per trasmissione con l'ambiente esterno	Flusso termico per trasmissione con il terreno	Flusso termico per trasmissione con ambienti non climatizzati	TOTALE (esterno + terreno + ambienti a temp. diversa)		
Palazzo Scacerni Sisti	A	67.046,59	13.458,09	28.748,74	109.253,42	26,31
	B	113.807,12	5.0418,11	3.745,28	167.970,51	2,23
	C	114.925,28	/	37.991,91	152.917,19	24,84
	D	172.012,29	/	24.056,58	196.068,87	12,27
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	1818.069,27	70.472,87	30.596,26	1.919.138,4	1,59
Palazzo Cicognara Sani	A	21.649,21	/	39.803,25	61.452,46	64,77
	B	55.782,39	/	26.509,97	82.292,36	32,21

	C	62.088,47	/	15.215,10	77.303,57	19,68	
	D	46.782,64	/	9.641,57	56.424,21	17,09	
	E	55.168,93	/	12.230,73	67.399,66	18,15	
	F	47.673,90	/	21.669,08	69.342,98	31,25	
	G	369.309,87	/	8.250,74	377.560,61	2,19	
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	305.217,29	30.784,32	100.993,96	436.995,57	23,11	
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	974.821,48	88.075,23	250.805,25	436701,96	57,43	

Tabella 7.20. Per ciascun caso studio sono stati analizzati gli scambi termici totali (colonna 5): scambi verso l'esterno (colonna 2), con il terreno (colonna 3) e con ambienti non climatizzati (colonna 4).

Per questa ragione è interessante vedere quanto questo abbia influenzato lo scostamento tra i risultati ottenuti con i diversi metodi. La descrizione degli ambienti confinanti a temperatura diversa è molto importante per la definizione degli scambi termici.

a) SCAMBIO TERMICO VERSO IL TERRENO

Lo scambio termico verso il terreno deve essere calcolato secondo la UNI EN ISO 13370. In assenza di dati di progetto attendibili o informazioni più precise il coefficiente di accoppiamento termico in regime stazionario tra gli ambienti interno ed esterno è dato da:

$$H_g = A \times U \times b_{tr,g} \text{ [W/K]} \quad (15)$$

Dove:

A = area dell'elemento;

U = trasmittanza termica della parte sospesa del pavimento (tra l'ambiente interno e lo spazio sottopavimento) espressa in W/m^2K ;

$b_{tr,g}$ = fattore di correzione.

Il metodo analitico standardizzato prevede di calcolare lo scambio termico con il terreno a seconda che questo sia *controterra* o su *spazio aerato*. Nel primo caso si descrivono le caratteristiche tecnologiche della soletta che poggia sul terreno, il terreno e lo spessore della parete perimetrale, nel secondo caso, la soletta pavimento, l'altezza della superficie del pavimento sopra il livello del terreno esterno, la resistenza termica della struttura pavimento e quella effettiva del terreno. Per il calcolo con metodo standardizzato dei casi studio sono state seguite queste indicazioni. Per il calcolo con metodi semplificati (*Docet* e secondo abaco UNI TS 11300-1) si è fatto riferimento alle tabelle contenenti i fattori di correzione $b_{tr,g}$ precalcolati.

Caso studio		SCAMBI TERMICI CON IL TERRENO				
		Tipologia di solaio a terra	Trasmittanza termica solaio calcolato con metodo UNI EN ISO 13370	Trasmittanza termica solaio calcolato con metodo Semplificato <i>Docet</i>	Trasmittanza termica solaio calcolato con metodo Semplificato UNI TS 11300-1	$b_{tr,g}$ secondo abaco UNI TS 11300 utilizzato nei metodi semplificati
Palazzo Scacerni Sisti	A	Solaio controterra	0,48	1,65	1,65	0,45
	B	Solaio su voltine in laterizio	1,67	1,65	1,50	0,80
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	Solaio controterra	0,46	1,65	1,65	0,45
Villa Molin	Zona	Solaio	0,29	1,65	2,00	0,45

Avezzù	termica unica	controterra				
Villa Barbaro	Zona termica unica	Solaio controterra	0,29	2,00	1,65	0,45

Tabella 7.21. Confronto tra il valore di trasmittanza del solaio a terra, calcolato con metodo standardizzato (colonna 3) e con metodi semplificati (colonne 4 e 5). Il fattore di correzione $b_{tr,g}$ indicato in colonna 6 è lo stesso sia per il metodo semplificato *Docet*, sia per quello indicato nella UNI TS 11300.

In *tabella 7.21* sono ridotti perché sono riportati solo i casi delle zone termiche che si sviluppano al piano terra e che quindi presentano un solaio a terra. Palazzo Cicognara Sani non ha nessuna zona termica riscaldata che poggi direttamente a terra. Il blocco abitato sul fronte strada è tutto sviluppato dal primo piano, sull'androne di ingresso le cantine e i garage, mentre il blocco verso il giardino su un altro blocco di cantine. Lo scambio termico di questo edificio è solo con l'esterno e con spazi non climatizzati, analizzati in seguito.

Si possono fare alcune osservazioni:

- in tutti i casi studio simulati (escluso Palazzo Scacerni Sisti, trattato nel punto successivo), il valore di trasmittanza termica dei solai a terra calcolati con il metodo analitico è molto inferiore rispetto a quelli selezionati dagli abachi, per i metodi semplificati. La ragione di questo scostamento è dovuto a una descrizione più corretta del sistema solaio, nel caso della simulazione con metodo standardizzato. Il metodo analitico ha permesso, infatti, di definire correttamente la tecnologia dei muri perimetrali, che hanno un comportamento energetico migliore di quello usato per il calcolo dei fattori di correzione tabulati. Questo si riflette positivamente sull'intero sistema solaio.

Il calcolo del solaio a terra come fosse un solaio esterno (per cui con scambi termici verso l'esterno e non verso terreno) darebbe un valore di trasmittanza termica molto più elevato rispetto a quello reale. I valori per i casi studio oscillerebbero tra i 1,50 e 1,84 W/m²K. I metodi semplificati prevedono di correggere questo valore con un fattore di correzione ($b_{tr,g}$) che limiti gli scambi termici considerando il ruolo isolante del terreno. I fattori di correzione sono indicati dalla UNI TS 11300 e selezionabili in tabella in base al tipo di solaio. Per tutte le tipologie di solaio si è scelta l'opzione *Basamento in calcestruzzo su terreno* (con diverse variazioni di spessore). I valori di trasmittanza termica sono molto diversi da quelli ottenuti con il metodo analitico perché il tipo di solaio selezionabile è molto diverso da quello effettivamente presente nei casi studio. Lo scostamento fra i risultati è di oltre il 200%. Questo influenza sensibilmente il valore di prestazione energetica dell'edificio, dal momento

che gli scambi termici con il terreno, in alcuni dei casi studio analizzati, superano il 12% degli scambi termici totali.

- La zona termica B di Palazzo Scacerni Sisti merita un'attenzione particolare. Il solaio a terra di questa zona (si rimanda alla scheda tecnologica del caso studio) poggia su una struttura in voltine di laterizio. Questa soluzione è molto diffusa nell'edilizia storica ed è difficile da descrivere energeticamente. Il metodo standardizzato ha permesso di definirlo energeticamente in maniera quanto più corretta possibile, descrivendo la tipologia di chiusura verticale che crea lo "spazio ventilato" e l'altezza delle voltine. Come si vede, il valore ($1,67 \text{ W/m}^2\text{K}$) è molto superiore a quello dei solai a terra degli altri casi studio. Lo scambio termico con uno spazio aperto verso l'esterno (sono presenti piccole finestre di ventilazione) è più svantaggioso rispetto al contatto con il terreno (che funge da isolante). Questa soluzione è più vantaggiosa in regime estivo perché mantiene più fresca e asciutta la struttura, ma il metodo di calcolo stazionario non consente di valutarlo. Come si legge sempre in *tabella 7.21* la trasmittanza termica calcolata analiticamente è superiore (quindi peggiore) di quella usata nei metodi semplificati, ottenuta dagli abachi della UNI TS 11300. Per il metodo semplificato UNI TS 11300-1 si è usato il valore di $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, corrispondente, nell'abaco, ad una *Soletta in laterocemento su vespaio o pilotis* di 30 cm. Lo spessore della soletta è quello corretto mentre non esiste nell'abaco una soluzione tecnologica simile a quella reale presente nel caso studio. Il metodo *Docet*, invece, permette di selezionare solo il valore corrispondente a una *Basamento in calcestruzzo su terreno* ($1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$). Questo dato è più simile a quello reale solo casualmente, dal momento che la tecnologia descritta è totalmente diversa da quella reale. Queste differenze sono alla base del diverso scostamento tra i risultati, nelle simulazioni di questa zona termica, della prestazione energetica $E_{p_i, inv}$, ottenuti con il metodo analitico e quelli semplificati.

La *tabella 7.22* evidenzia l'influenza del parametro *solaio a terra* sul calcolo finale. In tutti i casi (esclusa la zona B di Palazzo Scacerni Sisti) il valore di $E_{p_i, inv}$ calcolato con metodo semplificato è conservativo. Forzando nel *software* di calcolo il valore di trasmittanza termica del solaio a terra, sostituendo quello preso dal tabulato con quello calcolato analiticamente (*Figura 7.21*), il valore di $E_{p_i, inv}$ diminuisce avvicinandosi a quello calcolato con metodo standardizzato (lo scostamento medio è, dopo la variazione, del 14%). Questo significa che un calcolo corretto del solaio a terra può variare sensibilmente e positivamente il risultato finale.

Caso studio		SCAMBI TERMICI CON IL TERRENO					
		Tipologia di solaio a terra	Trasmittanza termica solaio calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370 (W/m ² K)	Trasmittanza termica solaio calcolato con metodo Semplificato <i>Docet</i> (W/m ² K)	Indice di prestazione energetica per l'involucro Metodo analitico (kWh/m ² a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro Metodo <i>Docet</i> / Metodo <i>Docet</i> forzando valore di trasmittanza termica solaio a terra (kWh/m ² a)	Scostamento fra i due risultati ottenuti con metodo <i>Docet</i> e Metodo <i>Docet</i> forzando il sistema (tra i due valori di colonna 6) (%)
Palazzo Scacerni Sisti	A	Solaio controterra	0,48	1,65	188,8	254,8 / 169,2	- 33,6
	B	Solaio su voltine in laterizio	1,67	1,65	326,13	326,5 / 334,1	+ 2,3
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	Solaio controterra	0,46	1,65	328,9	571,9 / 511,7	- 10,5
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	Solaio controterra	0,29	1,65	133,1	207,3 / 183,4	- 11,5
Villa Barbaro	Zona termica unica	Solaio controterra	0,29	1,65	124,4	172,1 / 142,8	- 17

Tabella 7.22. Confronto i valori di trasmittanza termica ottenuti con metodo analitico (colonna 3) e semplificato *Docet* (colonna 4), con i rispettivi valori di Indice di prestazione energetica relativa all'involucro (colonne 5 e 6). In colonna 7 è indicato lo scostamento tra il valore di prestazione energetica ottenuto con il metodo *Docet* usando i valori di trasmittanza del solaio a terra da tabulato e usando il valore di trasmittanza del solaio calcolato analiticamente.

Dove la componente di solaio a terra è molto importante (nel caso di S. Antonio in Polesine lo è sia da un punto di vista di estensione superficiale, sia di cattivo comportamento energetico) questa valutazione può influire decisamente sulle scelte progettuali per l'intervento di riqualificazione energetica.

Come si è visto, per il caso della zona termica B di Palazzo Scacerni Sisti, il valore tabulato è risultato migliore di quello analitico, anche se non di molto, per cui la variazione è del 2%. In realtà la valutazione della trasmittanza del solaio a terra è basata su una struttura completamente diversa e solo casualmente il dato è simile a quello calcolato analiticamente. Per questo motivo in questo caso studio il dato di simulazione semplificata è minore di quello analitico.

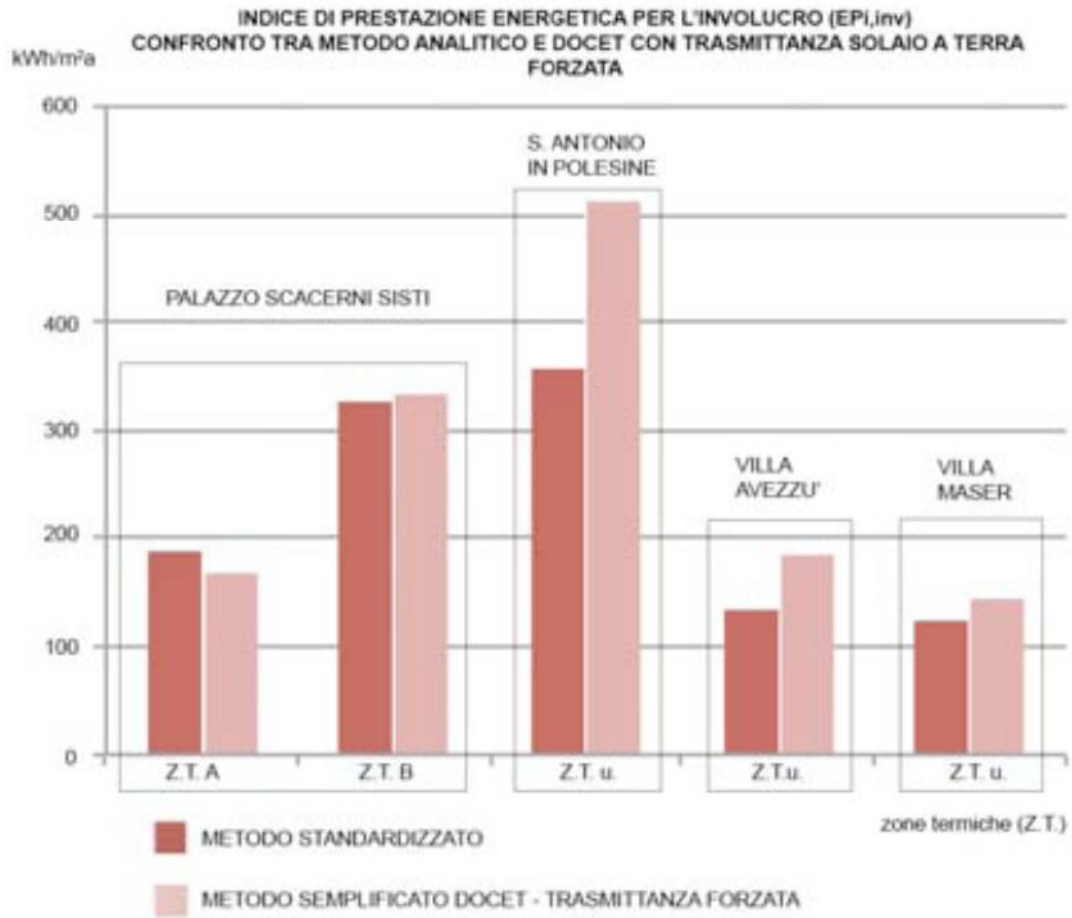


Figura 7.21. Il grafico riassume gli indici di prestazione energetica dei casi studio. Forzando il valore della trasmittanza termica del solaio a terra, con quello calcolato analiticamente, l'indice di prestazione energetica $E_{pi, inv}$ calcolato con il metodo semplificato *Docet* migliora significativamente, discostandosi da quello standardizzato del 14% (rispetto al 38% del valore precedente).

Box – proposte di soluzioni: CARATTERIZZAZIONE SCAMBI TERMICI - TERRENO

Metodo *Docet* e Metodo semplificato UNITS11300:

In entrambe le simulazioni con metodi semplificati lo scostamento tra i valori di trasmittanza termica per solai a terra calcolati analiticamente e selezionati da abaco normativo è superiore al 200%. L'approssimazione non è accettabile. La situazione peggiora nel caso di solaio su voltine, non contemplato dai tabulati.

> PROPOSTA:

- forzare obbligatoriamente il valore di trasmittanza termica del solaio a terra, utilizzando quello calcolato analiticamente e non quello selezionato dagli abachi;
- ampliare l'abaco di strutture fornite dalla normativa, con simulazioni sul campo che rilevino il comportamento energetico dei solai a terra storici, analizzando i reali scambi termici con il terreno per indicare valori di correzioni specifici per gli edifici storici. In particolare arricchendo l'abaco con gli scambi termici di *solai su voltine*, elementi tecnologici caratteristici degli edifici storici.

b) SCAMBIO TERMICO VERSO AMBIENTI NON CLIMATIZZATI

Il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione (H_U) tra il volume climatizzato e gli ambienti esterni attraverso gli ambienti non climatizzati si ottiene attraverso l'equazione:

$$H_U = H_{iU} \times b_{tr,x} \quad [W/K] \quad (17)$$

Dove:

$b_{tr,x}$ = *fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, diverso da 1 nel caso in cui la temperatura di quest'ultimo sia diversa da quella dell'ambiente esterno.*

Il fattore di correzione $b_{tr,x}$ si ottiene:

$$b_{tr,x} = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \quad (18)$$

Dove:

H_{iu} = *coefficiente globale di scambio termico tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente non climatizzato;*

H_{ue} = *coefficiente globale di scambio termico tra l'ambiente non climatizzato e l'esterno.*

Questo significa che, per descrivere correttamente gli scambi termici con ambienti non climatizzati è necessario, secondo il metodo analitico, definire correttamente le caratteristiche dell'elemento di confine tra l'ambiente climatizzato e quello non climatizzato (parete o solaio limitrofi) e le caratteristiche tecnologiche dell'ambiente non climatizzato. Da queste caratteristiche, infatti, dipende la temperatura dell'ambiente non climatizzato che viene influenzata dalla temperatura esterna e dalla capacità termica degli elementi tecnologici che definiscono l'ambiente. La temperatura dell'ambiente non climatizzato definisce la differenza di temperatura tra interno e "esterno".

Gli ambienti non climatizzati più diffusi sono, generalmente, gli androni di ingresso, le cantine, i garage e i vani scala. Soprattutto nel caso dell'edilizia storica, non si possono dimenticare i sottotetti, i piani interrati (che spesso fungevano da passaggi sottoterra o solai rialzati) e i portici chiusi, ma non riscaldati. L'importanza energetica di questi elementi "filtro" tra interno ed esterno è rilevante e va analizzata con precisione.

La normativa afferma, come negli altri casi, che in assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise i valori del fattore di correzione ($b_{tr,x}$) si possono assumere da tabelle specifiche²⁷. L'abaco è suddiviso secondo le diverse tipologie di ambiente confinante e in base ad alcune caratteristiche attribuite ai vani adiacenti con i quali avviene lo scambio termico (per esempio la destinazione d'uso). Per le simulazioni sui casi studio è stato utilizzato il metodo analitico per il calcolo standardizzato, il cui risultato è messo a confronto con i valori tabulati di $b_{tr,x}$, come si vede in *tabella 7.23*. Mentre le semplificazioni previste dalla UNITS 11300 consentono di selezionare il valore di $b_{tr,x}$ tra molteplici possibilità, il metodo *Docet* limita la scelta:

- per cantina/garage si seleziona la percentuale di estensione dell'elemento confinante (25%,50%,75%,100%) e se esso abbia o non abbia finestre e serramenti esterni;
- per il sottotetto si seleziona solo la percentuale di estensione del solaio confinante (25%,50%,75%,100%) senza poter indicare la tipologia di copertura soprastante;
- per il vano scala si indica il perimetro di confine e se esso sia interno senza affacci, interno o esterno.
- l'ultima possibilità è *altri ambienti*, dove si fanno ricadere le categorie di ambienti non indicate precedentemente, utilizzando, per il dimensionamento, il solo perimetro di confine tra i due vani.

In molti casi queste voci coincidono con i valori selezionati per il calcolo con metodo semplificato UNITS 11300, ma in altri il valore non coincide perché nel metodo semplificato *Docet* non è stato possibile descrivere con la stessa cura il sistema rilevato.

Caso studio		SCAMBI TERMICI VERSO AMBIENTI NON RISCALDATI				
		Tipologia di ambiente confinante	Fattore di correzione calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i>	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato UNITS11300	Scostamento tra i risultati (colonna 4 e 5 rispetto a colonna 3) (%)
Palazzo Scacerni Sisti	A	Solaio su cantina	0,89	0,8 <i>con finestre/ serramenti esterni</i>	0,6 <i>con serramenti esterni e almeno 2 pareti esterne</i>	- 10 / - 32,5

²⁷ Scambio termico verso ambienti non climatizzati, Prospetto 5 UNI TS 11300-1 paragrafo 11.2.

		Verso ambiente non riscaldato	0,94	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,6 <i>con serramenti esterni e almeno 2 pareti esterne</i>	-36,1 / - 36,1
		Verso Androne	0,91	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	- 34 / - 56
	B	Verso Androne	0,74	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,6 <i>con serramenti esterni e almeno 2 pareti esterne</i>	- 18,9 / - 18,9
	C	Parete su vano scala	0,06	0,4 <i>Vano scala Interno</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	+566 / + 566
		Parete verso sottotetto	0,14	0,7 <i>Tetto isolato</i>	0,7 <i>Tetto isolato</i>	+ 400 / + 400
		Solaio su androne	0,72	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	- 16,6 / - 30,5
		Solaio verso sottotetto	0,34	0,7 <i>Tetto isolato</i>	0,7 <i>Tetto isolato</i>	+ 105,88 / + 105,88
	D	Verso ambiente non riscaldato	0,95	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	- 36,8 / - 47,3
		Solaio verso sottotetto	0,12	0,7 <i>Tetto isolato</i>	0,7 <i>Tetto isolato</i>	+ 483 / + 483
		Verso Androne	0,58	0,6 <i>Altri ambienti</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	+ 3,4 / - 13,0
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	Parete verso vano scala	0,59	0,4 <i>Vano scala Interno</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	- 32,2 / - 32,2
Palazzo Cicognara Sani	A	Verso Androne	0,89	0,4 <i>Altri ambienti</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	- 55 / - 43
		Solaio su cantina	0,62	0,4 <i>con finestre/</i>	0,5 <i>senza serramenti</i>	- 35,4 / - 19,3

				<i>serramenti esterni</i>	<i>esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	
B	Verso vano scala	0,61	0,4	<i>Vano scala Interno</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	- 34,4 / - 34,4
	Solaio su androne	0,67	0,6	<i>Altri ambienti</i>	0,6 <i>con serramenti esterni e almeno 2 pareti esterne</i>	- 10,4 / - 10,4
C	Verso vano scala	0,62	0,4	<i>Vano scala Interno</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	-35,0 / - 35,0
D	Verso vano scala	0,72	0,4	<i>Vano scala Interno</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	- 44,4 / - 44,4
E	Verso vano scala	0,72	0,4	<i>Vano scala Interno</i>	0,5 <i>senza serramenti esterni e con almeno 2 pareti esterne</i>	- 44,4 / - 30,5
F	Parete su veranda	0,8	0,6	<i>Altri ambienti</i>	0,8 <i>con tre pareti esterne</i>	- 25 / 0
	Solaio su cantina	0,85	0,8	<i>con finestre/ serramenti esterni</i>	0,8 <i>con tre pareti esterne</i>	- 5,88 / - 5,88
G	Verso vano scala	0,43	0,4	<i>Vano scala Interno</i>	0,4 <i>con una parete esterna</i>	- 6,97 / - 6,97
	Verso magazzino	0,41	0,6	<i>Altri ambienti</i>	0,6 <i>con serramenti esterni e almeno 2 pareti esterne</i>	+ 46,34 / + 46,34
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	Solaio verso sottotetto	0,81	0,9 <i>Tetto non isolato</i>	0,9 <i>Altro tetto non isolato</i>	+ 11,1 / + 11,1
Villa Barbaro	Zona termica unica	Solaio verso sottotetto	0,74	0,9 <i>Altro tetto non isolato</i>	0,9 <i>Altro tetto non isolato</i>	+21,6 / +21,6

Tabella 7.23. Confronto i valori corrispondenti al fattore di correzione $b_{t,x}$ ottenuti con metodo analitico (colonna 3), metodo semplificato *Docet* (colonna 4) e metodo semplificato UNITS11300 (colonna 5).

La *tabella 7.23* mostra la molteplicità di soluzioni da descrivere per ogni caso studio. Per ciascuna di esse sono stati selezionati i valori di correzione corrispondenti alle tipologie di ambiente più simili al caso analizzato. Come si vede nell'ultima colonna lo scostamento è in alcune situazioni positivo (il segno + significa che il metodo semplificato è conservativo rispetto all'analitico e sovrastima lo scambio termico) e in altre negativo (il segno - significa che il metodo semplificato sottostima lo scambio termico). Le stime ottenute sono comunque evidentemente incongruenti, visto che si ottengono scostamenti dal valore analitico fino al 500%. Nel 70% dei casi il metodo semplificato sottostima lo scambio termico attraverso l'ambiente non riscaldato. Questa tendenza è contraria a quelle riscontrate fino ad ora, dove si è verificato che i metodi semplificati generalmente descrivono in via peggiorativa il comportamento energetico degli elementi. Nel metodo semplificato *Docet* non è possibile forzare il programma per verificare il miglioramento ottenibile nella simulazione sostituendo il valore tabulato con quello analitico. In ogni caso, se fosse possibile farlo, lo scostamento fra i risultati globali aumenterebbe, perché aumentando il valore corrispondente allo scambio termico con ambienti non riscaldati, peggiorerebbe anche il valore di $E_{p_i, inv}$ ottenuto.

Di seguito sono stati analizzati gli scambi termici suddivisi per categorie, usando come termine di paragone il valore usato nel metodo semplificato UNITS 11300 che permette un maggior numero di scelte e comunque si scosta dall'analitico del 45% circa come il metodo *Docet*.

Tipologia di ambiente confinante	Fattore di correzione calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3
VERSO CANTINA	0,89	0,6
	0,62	0,5
	0,85	0,8

METODO SEMPLIFICATO SOTTOSTIMA GLI SCAMBI TERMICI: 20%

Tabella 7.24. Valori del fattore di correzioni $b_{tr,x}$ relativi agli scambi termici con ambiente riconducibile alla categoria *Solaio su cantina*.

Tipologia di ambiente confinante	Fattore di correzione calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3
VERSO AMBIENTE NON RISCALDATO GENERICO (Androni, altri vani adiacenti)	0,94	0,6
	0,91	0,4
	0,74	0,6
	0,72	0,5

	0,95	0,5
	0,58	0,5
	0,89	0,5
	0,67	0,6
	0,8	0,8
	0,41	0,6

METODO SEMPLIFICATO SOTTOSTIMA GLI SCAMBI TERMICI: 20%

Tabella 7.25. Valori del fattore di correzioni $b_{r,x}$ relativi agli scambi termici con ambiente riconducibile alla categoria *Verso altro ambiente generico*.

Tipologia di ambiente confinante	Fattore di correzione calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3
VERSO VANO SCALA	0,06*	0,4
	0,55	0,4
	0,61	0,4
	0,62	0,4
	0,72	0,5
	0,72	0,5
	0,43	0,4

* In questo unico caso il valore semplificato sovrastima quello reale perché il vano scala in questione è molto particolare: volume di piccole dimensioni e racchiuso all'interno del fabbricato, con pareti perimetrali isolate. Questo giustifica una riduzione così importante degli scambi termici. E' un caso isolato quindi poco significativo per la trattazione.

METODO SEMPLIFICATO SOTTOSTIMA GLI SCAMBI TERMICI: 30%

Tabella 7.26. Valori del fattore di correzioni $b_{r,x}$ relativi agli scambi termici con ambiente riconducibile alla categoria *Verso vano scala*.

Nella valutazione degli scambi termici verso *cantine, altri ambienti generici e vano scala* il metodo semplificato sottostima le perdite, come si diceva in precedenza. La ragione prevalente di questo risultato dipende dalla caratterizzazione volumetrica, più che tecnologica, in questo caso, dell'ambiente confinante. In tutti i casi studio analizzati, le altezze interpiano sono molto ingenti (si aggirano tra i 4 e i 6 metri). Questo significa che il volume degli ambienti con cui avviene lo scambio termico è molto superiore (quasi del doppio) rispetto a quello ipotizzato per la determinazione degli abachi normativi utili alla semplificazione del metodo. La stessa normativa indica, nell'ultima riga dell'abaco (UNI TS 11300, Prospetto 5), che per "Aree di circolazione liberamente ventilate con rapporto tra l'area delle finestre e il

volume dell'ambiente maggiore di $0,005 \text{ m}^2/\text{m}^3$, il fattore di correzione sia pari a 1", quindi non migliorativo. Come si legge nelle tabelle i valori calcolati analiticamente si avvicinano molto a 1 ($0,7 \div 0,9$) perché gli spazi correttamente descritti sono molto grandi.

In *tabella 7.27* sono indicati i fattori di correzione per la descrizione degli scambi termici attraverso il vano sottotetto.

Tipologia di ambiente confinante	Fattore di correzione calcolato con metodo analitico UNI EN ISO 13370	Fattore di correzione calcolato con metodo semplificato
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3
VERSO SOTTOTETTO	0,14	0,7
	0,34	0,7
	0,12	0,7
	0,81	0,9
	0,74	0,9
METODO SEMPLIFICATO SOVRASTIMA GLI SCAMBI TERMICI: 250%		

Tabella 7.27. Valori del fattore di correzioni $b_{tr,x}$ relativi agli scambi termici con ambiente riconducibile alla categoria *Verso sottotetto*.

Nel caso dello scambio termico con il vano sottotetto, al contrario dei precedenti casi, il metodo semplificato sovrastima il valore di correzione. Nelle prime tre righe della tabella il valore di $b_{tr,x}$ calcolato analiticamente è molto basso perché la copertura è stata isolata in occasione dell'ultimo intervento di restauro. Lo scarto con il valore semplificato è comunque evidente perché la trasmittanza termica della copertura isolata da calcolo semplificato è maggiore di quella ottenuta con calcolo analitico ($U_{\text{analitico}} = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{semplificato}} = 1,09 \text{ W/m}^2\text{K}$). Pertanto anche la valutazione dello scambio termico è conservativa.

Lo scostamento esiste, ma diminuisce, negli ultimi due casi. La ragione resta comunque legata alla valutazione del comportamento energetico del pacchetto di copertura.

Il caso studio di S. Antonio in Polesine non presenta allo stato di fatto un sistema di controsoffitto che crei il sottotetto, ma ne sono evidenti le tracce. Dal momento che è stata simulata la situazione attuale non è stato valutato alcuno scambio termico filtrato attraverso il sottotetto. Se si ipotizzasse di ricostruirlo secondo le tracce originali il fattore di correzione sarebbe pari a 0,75 contro un valore da abaco di 0,9 (*verso tetto non isolato*), pertanto si confermerebbe la sovrastima degli scambi termici da parte del metodo semplificato.

In Palazzo Cicognara Sani, invece, l'ultimo restauro ha previsto di sfruttare tutto lo spazio sottotetto per la creazione di due appartamenti mansardati. Per questo, non si ritiene corretto valutare quali sarebbero gli ipotetici scambi termici attraverso lo spazio filtro del sottotetto, dal momento che è una situazione non più realizzabile.

Riprendendo la *tabella 7.22*, si legge come, forzando il valore di trasmittanza del solaio controterra, imponendo quindi al metodo semplificato gli scambi termici con il terreno come calcolati analiticamente, lo scarto tra il risultato analitico di $E_{p_i, inv}$ e quello semplificato diminuisca. Questo significa che il restante 20% circa di scostamento è da imputare alla definizione degli scambi termici con ambienti non climatizzati, come appena descritto. La reale difficoltà di descrivere accuratamente gli ambienti confinanti (da un punto di vista tecnologico e volumetrico) influisce in maniera assai significativa sul risultato finale.

Box – proposte di soluzioni: CARATTERIZZAZIONE SCAMBI TERMICI – AMBIENTI NON CLIMATIZZATI

Metodo Docet

Permette di selezionare solo alcuni valori di correzione tra quelli presenti nelle semplificazioni della normativa. Questo fa sì che sia più difficile descrivere accuratamente lo spazio confinante non climatizzato.

> PROPOSTA:

ampliare la possibilità di scelta dei fattori di correzione, in particolare per quanto riguarda la categoria *Altri ambienti* che al momento corrisponde ad un solo valore ma che deve essere affinata come avviene per il metodo semplificato UNITS11300.

Metodo semplificato UNITS11300:

i valori del coefficiente di correzione presenti nell'abaco sono calcolati per ambienti di nuova o recente costruzione con altezze interpiano di circa 3m. Questo aspetto porta il metodo semplificato a una sottostima degli scambi termici attraverso ambienti non climatizzati.

> PROPOSTA:

- nei casi in cui l'ambiente confinante abbia un'altezza interpiano maggiore di 3 metri aumentare il fattore di correzione tabulato del 30%, che tenga conto della differenza di volume;
- ampliare l'abaco dei fattori di correzione, attraverso simulazioni sul campo che rilevino il comportamento energetico degli ambienti non climatizzati adiacenti, in particolare per valutare il reale scambio termico prendendo in considerazione il rapporto tra involucro e volume dell'aria.

7.5.6. Conclusioni dell'analisi dei metodi di calcolo semplificati

L'analisi critica ha messo in evidenza due aspetti importanti sui metodi semplificati. In primo luogo questi sistemi di calcolo semplificati sovrastimano l'Indice di Prestazione Energetica per l'involucro. Il metodo di calcolo semplificato *Docet* sovrastima l'indice di prestazione energetica per l'involucro in media del 40%, mentre il metodo di calcolo semplificato UNI TS 11300 sovrastima l'indice di prestazione energetica per l'involucro del 20%. In secondo luogo, all'interno di queste approssimazioni, per quanto riguarda gli scambi termici, gli scambi termici verso l'esterno sono sovrastimati e gli scambi termici verso ambienti non climatizzati sono sottostimati.

Questo risultato è importante per valutare quali siano gli interventi necessari per la creazione di strumenti di indagine energetica specifici per l'edilizia storica. Infatti, quando il risultato dell'analisi energetica allo stato di fatto descrive un comportamento scadente delle chiusure esterne e uno scambio termico attraverso ambienti non climatizzati minore di quello reale, il progetto di riqualificazione sarà orientato alla massimizzazione dell'isolamento termico delle frontiere esterne, con tutti i problemi che questo comporta in un edificio storico, senza che ve ne sia reale necessità. Inoltre induce ad ignorare la possibilità di diminuire lo scambio termico con gli spazi interni all'edificio ma non riscaldati. Una stima più veritiera dei reali scambi termici è indispensabile per una progettazione opportuna degli interventi sull'involucro, che sono in molti casi assai delicati.

Come si è visto, il metodo semplificato *Docet* è quello che approssima più grossolanamente (40%) alcune informazioni descrittive della tipologia e dell'involucro dell'edificio. È, però, lo strumento più semplice e veloce da usare e maggiormente diffuso tra i professionisti. Per questa ragione, prima di scartarlo tra i metodi utilizzabili per l'edilizia storica si sono fatte alcune proposte di adeguamento, attraverso le quali il risultato della simulazione potrà migliorare sensibilmente. Purtroppo non è stato possibile quantificare il reale miglioramento del risultato mettendo in pratica tutte le modifiche proposte perché alcuni dati mancanti o non corretti per l'edilizia storica non sono modificabili se non modificando il codice sorgente del *software* di simulazione. Tali modifiche fanno parte del proseguimento della ricerca, perché implicano un lavoro congiunto con gli sviluppatori del *software Docet*. Per i dati su cui si è potuti intervenire si può riassumere che:

- forzando il valore della trasmittanza termica delle chiusure lo scostamento fra i risultati passa dal 40 al 20%;
- forzando il valore della trasmittanza termica del solaio a terra lo scostamento fra i risultati passa dal 40 al 14%;
- forzando entrambi i valori il risultato varia del 10% circa (*Tabella 7.28*). In questo caso il valore calcolato con il metodo semplificato *Docet* è addirittura inferiore a quello standardizzato. La ragione

dipende dal fatto che, mentre gli scambi termici con l'esterno sono sovrastimati, quelli con gli ambienti a temperatura diversa sono sottostimati. Intervenendo solo sugli scambi termici con l'esterno si evidenzia lo scostamento dovuto alla sottostima degli scambi termici con gli altri ambienti. Non potendo forzare i parametri relativi a questi ultimi, non è possibile ad oggi stimare con le simulazioni il miglioramento che si può raggiungere apportando gli affinamenti proposti.

Casi studio	INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO – METODO <i>DOCET</i>			
	Zone termiche	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p,inv}$), calcolato con metodo analitico standardizzato (kWh/m^2a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($E_{p,inv}$), calcolato con metodo semplificato <i>Docet</i> , forzando il valore di trasmittanza termica delle chiusure verticali e del solaio a terra (kWh/m^2a)	Scostamento tra i risultati % (colonna 4 rispetto a colonna 3)
COLONNA 1	COLONNA 2	COLONNA 3	COLONNA 4	COLONNA 5
Palazzo Scacerni Sisti	A	188,8	125,8	- 50,1
	B	326,1	308,6	- 5,7
Complesso di S. Antonio in Polesine	Zona termica unica	328,9	466,4	+ 23,4
Villa Molin Avezzù	Zona termica unica	133,1	126,8	- 5
Villa Barbaro Maser	Zona termica unica	124,4	115,9	- 7,3
SCOSTAMENTO MEDIO				- 8,9

Tabella 7.28. Risultato delle simulazioni condotte sui casi studio con il metodo semplificato *Docet*, forzando sia il valore di trasmittanza termica delle chiusure verticali sia dei solai a terra.

In *figura 7.22* si riassumono le indicazioni fornite per l'adeguamento del metodo di calcolo semplificato *Docet*.



Figura 7.22. L'immagine sintetizza le principali proposte di modifica per adeguare il metodo *Docet* all'edilizia storica, mantenendo la possibilità di raggiungere un risultato in tempi rapidi e con operazioni semplici.

La messa a punto di queste proposte per una loro implementazione all'interno del *software* di ausilio al calcolo rappresenta la base di partenza per la messa a punto di un sistema di calcolo che, in futuro, si potrebbe chiamare *DocetHB – Docet Historical Buildings*. Questo nuovo strumento rappresenta la mediazione tra la necessità di ottenere un dato di prestazione energetica sufficientemente corretto per un'opportuna progettazione degli interventi di riqualificazione energetica e il bisogno di semplificazione richiesto dai professionisti.

Con le modifiche proposte, il metodo, seppur rimanendo molto veloce, assomiglia maggiormente al metodo semplificato UNI TS 11300 perché richiede il calcolo manuale di molti più dati rispetto alla semplice selezione da menù tendina che avviene nella versione attuale del programma. Per questa ragione parallelamente, si è proposto, per ogni aspetto indagato, di ampliare i dati ad oggi selezionabili dagli abachi, attraverso misurazioni e prove sul campo. La creazione di abachi specifici per l'edilizia storica è fondamentale per poter creare strumenti di calcolo semplificati adeguati all'edilizia storica, senza dover calcolare analiticamente ogni dato. Attingere i valori da tabelle create appositamente permette di migliorare il risultato ottenuto, rendendolo accettabile anche per l'edilizia storica.

La UNI TS 11300 fornisce, all'Appendice B, un abaco delle strutture edilizie più diffuse in Italia per edifici esistenti. In molti casi però, non sono indicati i valori di conducibilità di alcuni materiali impiegati nelle strutture murarie. Per questa ragione, di seguito è indicata una proposta di abaco costruita a partire dalle strutture edilizie più ricorrenti nell'antichità. Per ogni componente tecnologico sono riportate un'immagine esemplificativa delle varie tipologie di materiale o di stratigrafia che si possono riscontrare e le indagini che vanno fatte per avere un abaco specifico per l'edilizia storica (*Tabella 7.29a-d*).

In *figura 7.23* è rappresentata la scheda tipo di rilievo elaborata come base per le future prove sul campo. L'effetto congiunto della proposta di abaco delle *tabelle 7.29* e dei nuovi rilievi proposti permetterà di fornire ai progettisti dei valori significativi di trasmittanza termica delle principali strutture edilizie dell'antichità.







CHIUSURE VERTICALI OPACHE	
 <p>Muratura piena in mattoni faccia a vista (con e senza intonaco):</p> <ul style="list-style-type: none"> - mattoni crudi; - mattoni cotti; - mattoni di provenienze geografiche diverse; - mattoni con condizioni igrometriche differenti. <p>Spessori: 20 ÷ 60 cm</p>	 <p>Muratura a sacco (con e senza intonaco):</p> <ul style="list-style-type: none"> - senza leganti; - con leganti. <p>Spessori: 60 ÷ 100 cm</p>
 <p>Muratura in pietrame (con e senza intonaco):</p> <ul style="list-style-type: none"> - senza leganti; - con leganti. <p>Spessori: 40 ÷ 80 cm</p>	 <p>Muratura in tufo (con e senza intonaco):</p> <ul style="list-style-type: none"> - dimensione elementi; - senza leganti; - con leganti. <p>Spessori: 40 ÷ 60 cm</p>
 <p>Muratura in argilla</p> <p>Spessori: 40 ÷ 80 cm</p>	 <p>Muratura in legno</p> <p>Spessori: 40 ÷ 60 cm</p>

Tabella 7.29a. Abaco delle principali strutture edilizie antiche, chiusure verticali.

CHIUSURE VERTICALI TRASPARENTI



Componenti trasparenti (finestre):

- Architrave o cornice in pietra;
- Architrave o cornice in laterizio;
- Architrave o cornice in legno;
- Assenza di cornice;
- Presenza di decorazioni rilevanti in termini di estensione superficiale e volumetrica

Tabella 7.29b. Abaco delle principali strutture edilizie antiche, chiusure trasparenti.

CHIUSURE SUPERIORI



Coperture lignee (isolate e non):

- con tavelle in laterizio;
 - con tavolato ligneo.
- Spessori: 15 ÷ 30 cm (esclusa parte portante)



Coperture a volta

- volte di mattoni;
- volte di pietra;
- volte di cemento.

Spessori: variabili

Tabella 7.29c. Abaco delle principali strutture edilizie antiche, chiusure superiori.

CHIUSURE INFERIORI



Solaio a terra:

- tradizionale;
- su voltine in laterizio.

Spessori: variabili

Tabella 7.29d. Abaco delle principali strutture edilizie antiche, chiusure inferiori.

SCHEDA TIPO PER IL RILIEVO ENERGETICO DI COMPONENTI TECNOLOGICI STORICI
PER LA CREAZIONE DI ABACHI NORMATIVI SPECIFICI

FOTOGRAFIA DELL'ELEMENTO

DATI RILIEVO

Nome rilevatore: _____

Ente di appartenenza: _____

Periodo di assunzione dati: _____

Breve descrizione della strumentazione utilizzata:

DATI ELEMENTO

Edificio in cui è presente l'elemento: _____

Anno di costruzione: _____

Luogo Stato: _____

Regione: _____

Città: _____

Zona climatica e gradi giorno: _____

Tipologia dell'elemento: Chiusura verticale Chiusura orizzontale inferiore Chiusura orizzontale superiore

Partizione verticale Partizione orizzontale Infisso esterno

Composizione del pacchetto tecnologico:

STRATIGRAFIA	SEZIONE ELEMENTO
1. _____	
2. _____	
3. _____	
4. _____	

Natura e provenienza dei materiali impiegati (per es. mattone cotto o crudo, muratura a sacco con o senza leganti, ecc...):

Orientamento: Nord Sud Est Ovest Nord/Est Nord/Ovest Sud/Est Sud/Ovest

Livello di degrado: _____

Presenza di ponti termici dovuti a disomogeneità della struttura (%): _____

Presenza di umidità nella struttura (g/m³): _____

Figura 7.23. Scheda tipo per lo svolgimento dei rilievi energetici delle principali strutture edilizie storiche.

Come dimostrato nell'analisi degli scambi termici con ambienti non climatizzati, le approssimazioni sarebbero molto più precise se ci fosse la possibilità di selezionare fattori di correzione degli scambi termici appropriati al tipo di ambienti tipici degli edifici storici. Anche per questi si è proposto di ampliare l'abaco (prospetto 5 UNI TS 11300) con valori rilevati sul campo. In particolare sono indicati in *tabella 7.30* i principali ambienti da indagare.






AMBIENTI NON CLIMATIZZATI	
 <p>Piani interrati (buffer inferiore):</p> <ul style="list-style-type: none"> - cantine; - passaggi sotterranei; - cunicoli. 	 <p>Sottotetto (Buffer superiore)</p> <ul style="list-style-type: none"> - tipologia di controsoffitto (arellato, legno,...); - tipologia di copertura (si veda abaco chiusure superiori).
 <p>Androni</p>	 <p>Vani scala</p>
 <p>Portici (qualora già chiusi con vetrate o tamponamenti)</p>	

Tabella 7.30. Principali ambienti non climatizzati attraverso cui avviene scambio termico.

7.6 Simulazione energetica in regime dinamico dei casi studio

Oltre alla simulazione energetica dei casi studio con metodi di calcolo in regime mediamente stazionario (metodo analitico e metodi semplificati) è stata condotta una simulazione energetica dei casi studio con il metodo di calcolo analitico standardizzato in *regime dinamico*, prendendo, cioè, in esame anche i fenomeni transitori climatici.

Per questo calcolo si è usato l'ausilio del *software Energy Plus® + Design Builder®*²⁸. Diversamente dai *software* di calcolo in regime statico, costruiti su modelli parametrici, questo programma ha una piattaforma di modellazione tridimensionale che permette di creare anche geometrie complesse. La caratteristica formale del volume da climatizzare non influenza direttamente la prestazione energetica dell'edificio, ma lo fa in maniera indiretta, permettendo di includere nell'analisi l'effetto radiante solare sulle superfici reali e i moti convettivi che si creano all'interno dei locali.

Il calcolo in regime dinamico è stato fatto considerando i casi studio integralmente e non più suddivisi in zone termiche. Il *software* utilizzato, infatti, permette di modellare l'edificio in tutte le sue parti associando a ciascuna zona il proprio tipo di impianto di climatizzazione (cosa non possibile nel calcolo standardizzato in regime mediamente stazionario).

Di seguito sono riportati i risultati principali delle simulazioni fatte con il *software Energy Plus*, per ciascun caso studio.

Le simulazioni effettuate in regime dinamico (*figure 7.24-7.27*) mettono in evidenza un comportamento peculiare degli edifici presi in esame. La normativa indica come periodo di climatizzazione invernale i sei mesi compresi tra metà Aprile e metà Novembre. Tutti gli edifici analizzati, ad eccezione di S. Antonio in Polesine, hanno un involucro edilizio con prestazioni così buone che non è necessario climatizzare meccanicamente, per mantenere la temperatura interna di progetto (20°C) nei mesi di Aprile e Ottobre. Infatti, nei grafici, l'energia richiesta per la climatizzazione relativa a quei due mesi è quasi nulla come nel periodo estivo. Questa considerazione è possibile solo guardando i risultati di una simulazione condotta in regime dinamico.

²⁸ Il *software Energy Plus®* è distribuito gratuitamente dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti ed è utilizzato con interfaccia *Design Builder®*, elaborato in Gran Bretagna, che basa il suo calcolo sul codice ASHRAE.
DOE U. S. Department of Energy. www.energy.gov
www.designbuilder.co.uk.

PALAZZO SCACERNI SISTI

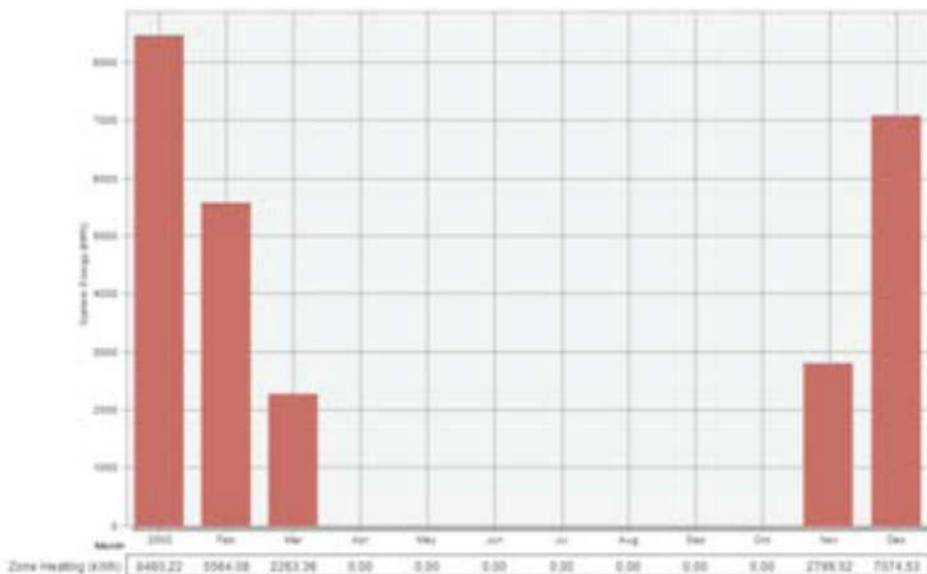


Figura 7.24. Risultati delle simulazioni energetiche in regime dinamico. Il grafico riporta i valori mensili dell'indice di prestazione energetica per l'involucro

INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO - valore annuo: 27,28 kWh/m²a

S. ANTONIO IN POLESINE

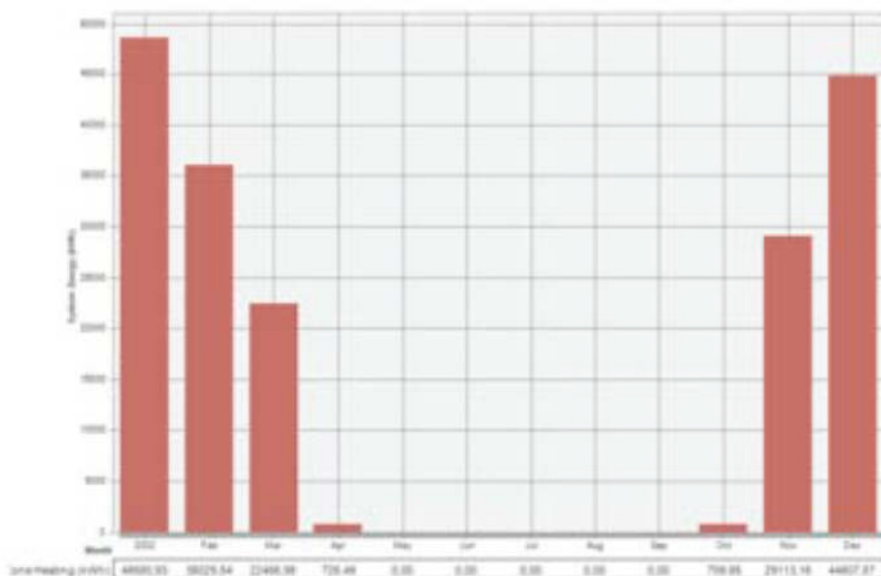


Figura 7.25. Risultati delle simulazioni energetiche in regime dinamico. Il grafico riporta i valori mensili dell'indice di prestazione energetica per l'involucro.

INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO - valore annuo: 182,53 kWh/m²a

PALAZZO CICOGNARA SANI

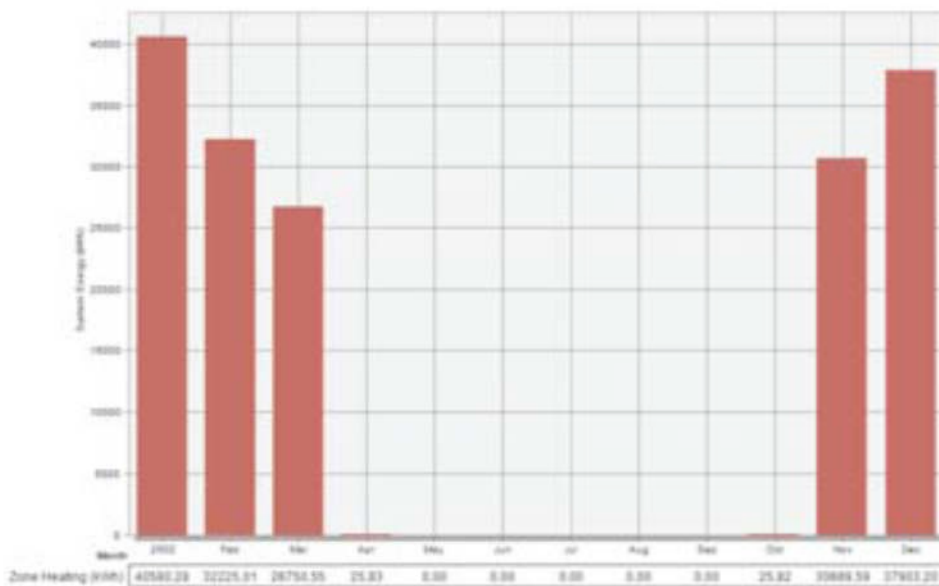


Figura 7.26. Risultati delle simulazioni energetiche in regime dinamico. Il grafico riporta i valori mensili dell'indice di prestazione energetica per l'involucro.

INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO - valore annuo: 102,7 kWh/m²a

VILLA MOLIN AVEZZU'

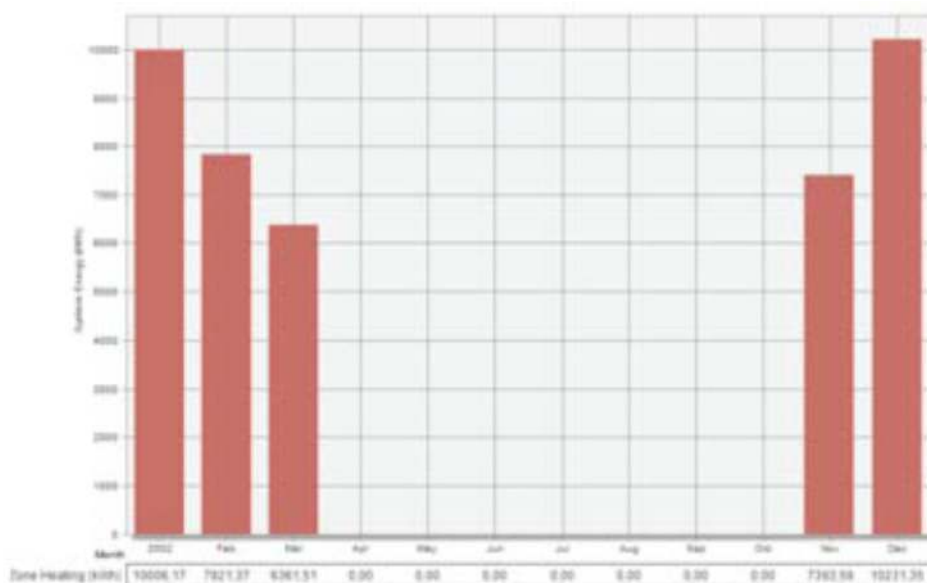


Figura 7.27. Risultati delle simulazioni energetiche in regime dinamico. Il grafico riporta i valori mensili dell'indice di prestazione energetica per l'involucro

INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO (valore annuo): 86,12 kWh/m²a

In *tabella 7.31*, si riportano i risultati delle simulazioni e sono messi a confronto gli indici di prestazione energetica per l'involucro ottenuti in regime dinamico con i risultati ottenuti con il metodo analitico standardizzato in regime mediamente stazionario.

Casi studio	INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA PER L'INVOLUCRO EP_{LINV} – METODO DINAMICO		
	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo standardizzato in regime mediamente stazionario (kWh/m ² a)	Indice di prestazione energetica per l'involucro ($EP_{i,inv}$), calcolato con metodo standardizzato in regime dinamico (Design Builder – Energy plus) (kWh/m ² a)	Scostamento tra i risultati %
Palazzo Scacerni Sisti	193,5	27,28	-85
Complesso di S. Antonio in Polesine	328,9	182,53	-44
Palazzo Cicognara Sani	143,3	102,7	-28
Villa Molin Avezzù	133,1	86,12	-35
Villa Barbaro Maser	124,4	50,85	-59
SCOSTAMENTO MEDIO			-50

Tabella 7.31. Risultati delle simulazioni operate sui casi studio, mettendo a confronto l'Indice di prestazione energetica per l'involucro ottenuto con Metodo standardizzato in regime mediamente stazionario (colonna 2) e in regime dinamico (colonna 3).

Come si può vedere in *tabella figura 7.31*, i risultati ottenuti con il metodo dinamico sono tutti inferiori a quelli calcolati in regime mediamente stazionario. Lo scostamento è in media del 50%.

Considerando che i dati di *input* sulla caratterizzazione termica dell'edificio sono gli stessi calcolati e usati nel metodo analitico, significa che il modello dinamico tiene conto con maggiore precisione alcuni fattori tipici dell'edificio storico, che influenzano positivamente il risultato.

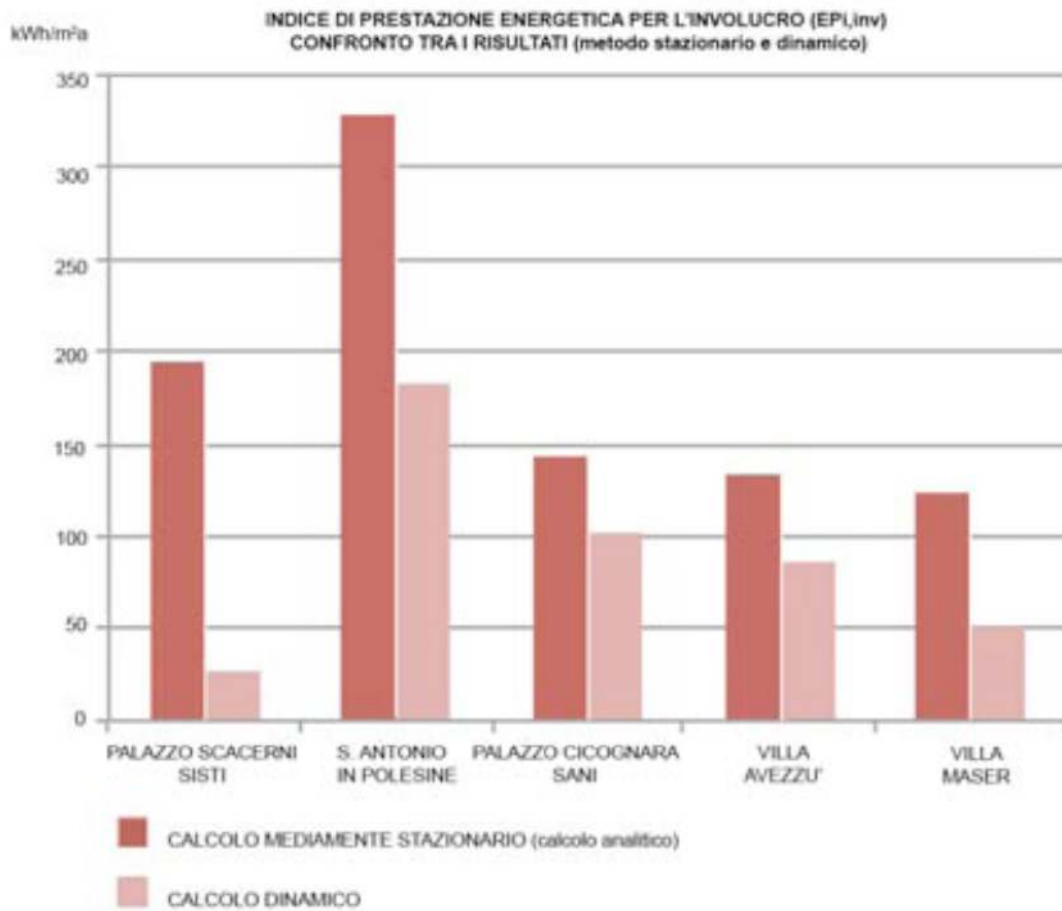


Figura 7.29. Confronto tra i risultati ottenuti con il metodo standardizzato in regime mediamente stazionario e in regime dinamico sui casi studio allo stato di fatto.

Questo risultato dipende in particolare da alcuni aspetti:

- **capacità termica dell'involucro:** le simulazioni effettuate in regime stazionario consentono di indagare solo parzialmente le reali prestazioni di un edificio perché partono dall'assunto che la variazione periodica delle temperature e il contributo della radiazione solare possano essere trascurati. Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece, permettono un'analisi molto più realistica e completa, valutando nel dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e quindi della capacità termica degli elementi tecnologici di grandi spessori che definiscono gli edifici storici. Perciò, mentre il modello statico è poco sensibile agli effetti della capacità termica dell'edificio

nel rispondere alla variabilità delle condizioni climatiche, la simulazione dinamica stima gli effetti di accumulo indiretto (sul lato interno) dovuti all'apporto di radiazione solare che penetra nell'edificio attraverso le superfici trasparenti e, in parte, alla migliore prestazione che si ottiene tenendo conto delle oscillazioni di temperatura esterna contenuti dal file climatico orario (effetto *buffer*);

- **ventilazione naturale:** i modelli stazionari stimano nello stesso modo le perdite di calore per ventilazione perché esse derivano dal prodotto della portata volumetrica per la differenza di temperatura interno – esterno (25°C) per la capacità termica dell'aria. Il modello dinamico stima una quantità superiore perché suppone la temperatura interna non costante a 20°C, ma considera che possa assumere valori superiori in ragione dei guadagni, solari e interni, gratuiti;
- **flussi convettivi e radianti:** il calcolo dinamico opera ad intervalli orari, per i quali calcola simultaneamente i flussi convettivi e radianti e ricava una soluzione basata sul bilanciamento del calore.

La variazione climatica, in particolar modo relativa all'apporto di radiazione solare, valutata con strumenti più sofisticati, non ha un ruolo fondamentale nella determinazione del fabbisogno energetico degli edifici, ma consente di apprezzare i vantaggi dati dalla capacità termica dell'involucro. Lo strumento stazionario, che considera solo la trasmittanza termica dell'involucro, è accettabile solo dove la massa è ridotta (edifici leggeri) mentre nei casi di grandi masse, come nella grande maggioranza degli edifici storici, è necessario un calcolo dinamico.

Il calcolo in regime dinamico mette in evidenza la riduzione dei fabbisogni energetici determinata dallo smorzamento dei picchi di freddo. La maggiore precisione dello strumento permette di valutare la prestazione energetica residua dell'edificio storico contemplando tutte quelle caratteristiche dell'involucro e della composizione geometrica dell'edificio che altrimenti si perderebbero. Questo si traduce in un migliore progetto di riqualificazione energetica che si basa su un calcolo più preciso dell'indice di prestazione energetica, che in molti casi è decisamente (50%) inferiore e permette un intervento più delicato, garantendo efficienza energetica senza rinunciare a un rispetto maggiore per i valori testimoniali del fabbricato.

Box – proposte di soluzioni: SIMULAZIONI IN REGIME DINAMICOModello mediamente stazionario

Non considera i fenomeni transitori, determinati dalle variazioni climatiche e dalla capacità termica dell'involucro edilizio storico. Questi aspetti invece influenzano positivamente il calcolo della prestazione energetica, che con il metodo in regime dinamico risulta in media del 50% inferiore.

> PROPOSTA:

per un edificio storico che presenti grande inerzia termica (*edificio pesante* – minimo 230Kg/m^2 ²⁹) e una geometria di ambienti complessa (con volumi e altezze interpiano rilevanti – maggiori o uguali a 4 metri) è necessario condurre il calcolo in regime dinamico per ottenere un dato di prestazione energetica più veritiero.

7.7 Valutazione del metodo di calcolo standardizzato

Si è visto che il calcolo in regime dinamico risulta più preciso di quello in regime mediamente stazionario; la normativa non richiede il calcolo dinamico obbligatoriamente, ma nel caso dell'edilizia storica la differenza fra i risultati è rilevante. In entrambi i calcoli, però, i dati di *input* per lo svolgimento della simulazione sono gli stessi, definiti in base alle indicazioni della normativa per il calcolo analitico standardizzato. Le osservazioni possono essere in gran parte le medesime.

Nel *paragrafo 7.5*, si è evidenziato quali siano le semplificazioni che, nel caso dell'edilizia storica, non sono accettabili o che devono essere adeguate per un calcolo *semplificato* specifico. L'analisi è stata fatta prendendo, come dato valido per il confronto, l'indice di prestazione energetica per l'involucro $E_{p,i,inv}$ (e nello specifico tutti gli elementi che concorrono al suo raggiungimento) ottenuto seguendo le indicazioni della normativa, in base al metodo analitico standardizzato. Come si è visto, i dati che influenzano negativamente il calcolo secondo i metodi semplificati, sono quelli relativi alla caratterizzazione energetica dell'involucro e degli scambi termici con l'esterno e con ambienti a temperature diverse.

I dati utilizzati per condurre il calcolo con il metodo standardizzato sono derivati dal rilievo architettonico degli edifici campione, dall'analisi delle componenti tecnologiche e dei materiali presenti nei fabbricati e dallo studio della letteratura (per la determinazione dei parametri che non si possono conoscere senza un rilievo energetico diretto e strumentale). Questo significa che il calcolo analitico standardizzato è stato

²⁹ Il riferimento numerico di 230Kg/m^2 è ricavato dal D.Lgs 192/2005. Il Decreto stabilisce questo limite di massa superficiale delle pareti per il contenimento dei fabbisogni energetici in regime estivo. In questo caso è stato utilizzato per quantificare il concetto di *edificio pesante* spesso usato per descrivere le architetture storiche caratterizzate da notevole inerzia termica.

condotto nel modo più preciso possibile, con i dati a disposizione. Alcune delle supposizioni, però, sono state fatte senza poter accertare se la situazione energetica fosse realmente tale, mentre in altri casi, si sono dovute fare delle approssimazioni visto che non era possibile ottenere un dato analitico con le parziali informazioni disponibili. Infatti, la normativa stessa suggerisce, in mancanza di dati specifici, di operare delle semplificazioni. Questo accade, in particolare, quando si calcola la prestazione energetica di un edificio esistente, del quale non si ha a disposizione il progetto completo. La situazione, nel caso dell'edilizia storica è ancora più esasperata, non potendo conoscere con certezza l'evoluzione architettonica e tecnologica dei fabbricati e la specifica composizione dell'involucro. Il dato che si ottiene tramite calcolo analitico standardizzato è, quindi, il più corretto tra tutti quelli a disposizione ma difficilmente riesce a descrivere in maniera realmente attendibile il comportamento energetico del fabbricato storico. Se si fosse in possesso di tutte le informazioni necessarie, il calcolo analitico sarebbe corretto. Questo paragrafo ha l'obiettivo di evidenziare le difficoltà che si riscontrano nell'applicazione del metodo di calcolo analitico standardizzato agli edifici storici, in assenza di rilievi energetici strumentali (piccoli sondaggi e/o misurazioni in loco).

Per chiarezza nella trattazione, il paragrafo è strutturato come il 7.5 (*Valutazione dei metodi di calcolo semplificati*), per evidenziare quali degli aspetti su cui si è basata la critica fino a questo momento, siano stati più difficili da controllare e descrivere, oltre ad alcuni aspetti caratteristici del solo calcolo analitico.

Il primo punto dell'analisi precedente *Caratterizzazione tipologica dell'edificio*, non presenta nessun problema per l'applicazione del metodo analitico perché si basa sul rilievo dimensionale del fabbricato. Pertanto non è stato più considerato in questa seconda parte della trattazione.

7.7.1 Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione termica dei componenti di involucro.

Il primo aspetto da valutare riguarda la descrizione del sistema tecnologico che costituisce l'involucro. Per compiere una corretta caratterizzazione termica dell'edificio, bisogna seguire la UNI EN ISO 6946 per gli elementi opachi e la UNI EN ISO 10077-1 per quelli trasparenti.

Componenti opachi

$$U = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \sum_i \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{R_e}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (20)$$

Dove:

- U = Trasmittanza termica;
- R_i = Resistenza superficiale interna;
- R_e = Resistenza superficiale esterna;
- s = spessore dello strato di materiale;
- λ = conduttività termica del materiale.

Componenti trasparenti

$$U_w = \frac{\sum (A_g \times U_g) + \sum (A_f \times U_f) + \sum l_g \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (21)$$

Dove:

- U_g è la trasmittanza termica della vetrata;
- U_f è la trasmittanza termica del telaio;
- Ψ_g è la trasmittanza termica lineare dovuta agli effetti termici combinati della vetrata, del distanziatore e del telaio;
- A_g è l'area della vetrata;
- l_g è il perimetro totale della vetrata;
- A_f è l'area del telaio.

Come si legge nelle equazioni (20) e (21) i dati richiesti per la caratterizzazione termica di un elemento strutturale sono molteplici e molto precisi. Le principali difficoltà nell'applicare tali espressioni in un edificio storico riguardano in particolare:

- A. **CALCOLO DELLA TRASMITTANZA TERMICA** dei materiali che costituiscono l'involucro.
La normativa prescrive che le proprietà termofisiche dei materiali siano ricavate dai dati di accompagnamento della marcatura CE. Nel caso dell'edilizia storica è assai improbabile avere a che fare con materiali certificati, di cui si conoscano i reali valori di conducibilità termica (λ), necessari al calcolo della trasmittanza termica. I materiali, oggi certificati, simili a quelli usati in passato (laterizi, legno o pietra, per esempio) possono aver subito nel tempo delle variazioni igrometriche difficilmente quantificabili, che ne potrebbero aver modificato la capacità termica

originaria³⁰. Questo vale sia nel caso delle chiusure verticali e orizzontali sia per i serramenti. I valori certificati che si trovano oggi sono quelli relativi a vetri e infissi moderni, che presentano prestazioni energetiche molto superiori. Per di più, nel caso del serramento si presenta un altro problema legato alla definizione del giunto vetro – telaio. Come si legge nella *formula 21*, infatti, è necessario, per il calcolo, conoscere la Ψ_g , cioè *la trasmittanza termica lineare dovuta agli effetti termici combinati della vetrata, del distanziatore e del telaio*.

B. CALCOLO DELLA RESISTENZA SUPERFICIALE INTERNA (R_i).

Il valore dipende dalla temperatura interna media dell'aria e si deve tenere conto che la temperatura dell'aria non è omogenea a causa della stratificazione termica e della temperatura radiante non uniforme negli angoli e negli spigoli. Nel caso dell'edilizia storica, in presenza di ambienti con altezze interpieno molto rilevanti (nei casi studio ci sono ambienti di 6 metri di altezza) la stratificazione dell'aria è più significativa che in ambienti con volumi inferiori. Questo aspetto può far variare, rispetto allo *standard*, i valori delle resistenze superficiali interne.

C. FLUSSO TERMICO ATTRAVERSO LA PARETE.

I muri degli edifici antichi, seppure presentino nel complesso una bassa resistenza termica, hanno un'elevata inerzia, che genera situazioni di transitorio per cui non è verificata la condizione alla base della relazione che definisce il flusso termico costante in ogni sezione del muro, secondo l'equazione (22).

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}] \quad (22)$$

Dove:

Φ è il flusso termico attraverso la parete, espresso in Watt;

h_i è la resistenza superficiale interna;

h_e è la resistenza superficiale esterna.

Quindi, in murature caratterizzate da grandi spessori e masse elevate (come quelle riscontrate nei casi studio analizzati) la costante di tempo tende ad essere elevata e così anche la capacità

³⁰ La UNI 10351 indica, per ciascun materiale da costruzione il valore di conducibilità termica e una maggiorazione percentuale per il contenuto di umidità del materiale stesso. La norma afferma che "se le effettive condizioni del materiale o del manufatto non coincidono con quelle indicate, occorre ricalcolare i coefficienti di correzione". Chiaramente, in edifici storici, senza un calcolo della effettiva presenza di umidità nella componente tecnologica analizzata, non è possibile conoscere questo dato.

di smorzare le fluttuazioni di temperatura (inerzia termica), modificando il calcolo della trasmissione di calore.

D. CONOSCENZA DELLA REALE STRATIGRAFIA che costituisce l'involucro.

Per determinare i pacchetti tecnologici che costituiscono l'involucro dei casi studio analizzati, ci si è basati sul rilievo architettonico, il sopralluogo e lo studio della letteratura. In assenza di sondaggi o indagini più accurate (non possibili in nessuno dei casi analizzati) sono state ipotizzate alcune stratigrafie, sulla base di una ricostruzione verosimile dell'involucro. In particolare, i dati meno sicuri sono quelli relativi ai solai a terra e alle coperture, nei casi in cui ci fosse un controsoffitto e la struttura non fosse a vista.

Nel caso studio di Villa Avezzù e Villa Barbaro si è ipotizzato che le chiusure verticali siano costituite da un muro a sacco, perché lo stesso Palladio suggerisce, nei *Quattro libri dell'Architettura*, di realizzare i muri con questa tecnica. A parte le informazioni generali, però, non si conosce la reale composizione del pacchetto murario e la consistenza dell'intercapedine interna riempita con materiali sfusi.

Il secondo aspetto relativo alla caratterizzazione termica dell'involucro, degno di attenzione è quello dei ponti termici. Per la determinazione della trasmittanza termica degli elementi tecnologici, un valido aiuto è fornito da strumenti di rilievo energetico diretto come le piastre flussimetriche, che permettono di misurare i valori di trasmittanza in opera delle chiusure opache e trasparenti e forniscono un dato rilevato sul caso reale. Il pericolo di affidarsi a questo tipo di strumenti, per ottenere il valore di trasmittanza termica delle componenti tecnologiche in analisi, dipende dal fatto che lo strumento riesce ad essere utilizzato soltanto su alcune porzioni dell'elemento. Infatti, per poterlo adoperare, è necessario avere un'apertura (porta o finestra) per posizionare una piastra sulla facciata interna e una sul lato esterno, in corrispondenza l'una dell'altra. Per questa ragione, lo spazio di acquisizione dati è ridotto soltanto a qualche porzione dell'intera facciata e può non rappresentare un campione significativo. In un edificio storico, gli elementi possono essere anche molto disomogenei, a causa della posa degli elementi stessi o delle trasformazioni dovute al degrado e al tempo trascorso. E', quindi, necessario affrontare in dettaglio il tema dei ponti termici, molto delicato per gli edifici antichi.

I ponti termici³¹ possono crearsi in corrispondenza delle giunzioni tra gli elementi edilizi o dove la composizione degli elementi subisca una modificazione.

³¹ I ponti termici sono descritti nella UNI EN ISO 10211 parti 1 e 2 - Ponti termici in edilizia. Calcolo dei flussi termici e delle temperature superficiali.

Determinare la presenza di ponti termici in un edificio storico può essere molto difficile. Le chiusure verticali ed orizzontali presentano, in numerosi casi, delle disomogeneità oppure elementi tipici degli edifici storici che non è semplice approssimare per la valutazione del ponte termico. Ne sono un esempio le buche pontate, i vecchi camini oggi chiusi e non visibili, le canalizzazioni nascoste, i vuoti sopra le volte, le catene metalliche di facciata, i piatti metallici, i cordoli di irrigidimento o il risultato della tecnica del “cuci e scuci” dovuto a passati restauri, le lesene, le cornici di porte e finestre, i cornicioni, il bugnato delle facciate, i timpani, e molto altro (*Figure 7.30 e 7.31*). In molti casi, può essere impossibile fare sondaggi approfonditi per avere conferma della loro presenza o per quantificarne l'estensione superficiale, oltre alla reale impossibilità di indagare in questo modo l'intero involucro edilizio. In questi casi, l'uso di piastre flussimetriche, limitato a poche parti dell'edificio, potrebbe non essere sufficiente a determinare la reale complessità dei ponti termici presenti.

Inoltre, in molti edifici storici le murature sono costruite con spessori variabili in altezza; il basamento dell'edificio, in generale il primo piano, veniva realizzato con spessori molto più grossi (80-100 cm) rispetto ai piani superiori nei quali si assottiglia per alleggerire il peso complessivo della struttura. Tale variazione di spessore, è tecnicamente una variazione dell'involucro che andrebbe tenuta in considerazione come ponte termico. Sezionare l'involucro in tante parti quante sono, però, le variazioni dello spessore, è davvero molto complesso perché a questa varietà va aggiunta quella data dalle differenze stratigrafiche presenti negli edifici storici a seconda dell'orientamento dei fronti, come si è visto nelle simulazioni dei casi studio.

Per quanto riguarda i ponti termici, la UNI EN ISO 10211 indica i dati necessari per il calcolo corretto, che di seguito sono riportati, così come presenti in normativa.

I) Descrizione della struttura:

- disegni costruttivi completi di dimensioni e descrizione dei materiali;
- per un edificio già terminato, l'indicazione di ogni modifica nota della costruzione e/o tutti i risultati di misurazioni e i dettagli rilevati da controlli diretti sul campo;
- tutte le osservazioni che si ritengono utili.

II) Descrizione del modello geometrico:

- modello 3-D completamente quotato;
- dati di ingresso con l'indicazione della posizione dei piani di costruzione e dei piani ausiliari e le conduttività termiche dei diversi materiali;
- temperature al contorno utilizzate;
- se necessario, calcolo della temperatura al contorno negli ambienti adiacenti al modello;
- resistenze termiche superficiali e superfici a cui si riferiscono;

- tutte le correzioni alle dimensioni effettuate come indicato al punto 5.2.1 della norma;
- tutti gli strati quasi omogenei con le relative conduttività termiche calcolate secondo il punto 5.2.2 della norma;
- tutti i valori non normalizzati utilizzati e le relative giustificazioni.

Nel caso di edifici storici non è facile, se non addirittura impossibile, ottenere tutte queste informazioni. La normativa prevede un metodo semplificato anche per il calcolo dei ponti termici, descritto nella UNI EN ISO 14683; tale metodo permette di determinare lo scambio termico attraverso i ponti termici utilizzando dei valori di riferimento tabulati (prospetto A.2.). In questo caso, però, il calcolo non sarà più standardizzato ma semplificato. Le difficoltà nel calcolo dei ponti termici sono molto elevate anche quando si deve descrivere un ponte termico noto (i ponti termici *standard* come attacco parete – solaio a terra, attacco parete – copertura, solaio interpiano e infissi). In alcuni dei casi studio analizzati è stato necessario rifarsi alle tabelle di riferimento perché non era possibile descrivere accuratamente tutti i tipi di ponte termico; sarebbe stato necessario un rilievo energetico di tutti gli elementi coinvolti.



Figura 7.30.

Alcuni esempi di ponti termici ricorrenti nell'edilizia storica. Le immagini a e b mostrano la presenza di canne fumarie nascoste, appartenenti ad antichi camini. L'immagine c mostra la variazione nella tessitura muraria dovuta al tamponamento di una porta e l'immagine d, una facciata composita con spigoli e portali bugnati, finestre con cornice e timpano in pietra.



Figura 7.31. Varie tipologie murarie presenti nell'edilizia storica. La conformazione di queste strutture edilizie è molto disomogenea, caratterizzata da un'alternanza di materiale, tessiture diverse sovrapposte e molteplici ponti termici (causati da mancanza di legante o deterioramento).

Come ulteriore prova di questa difficoltà si riprende il caso studio di Apice Vecchia³², presentato già nel capitolo 4. Il rilievo tecnologico delle strutture prevalenti del Borgo storico in esame ha evidenziato la presenza massiccia di strutture di elevazione costituite da muratura a sacco in pietrame e muratura a sacco in pietrame e tufo. Il calcolo delle prestazioni termiche delle strutture è stato eseguito, come per gli edifici caso studio descritti in precedenza, secondo la normativa UNI TS 11300, con metodo analitico standardizzato. È stato molto difficile, però, definire la trasmittanza termica di questa tipologia di struttura. La quantità di materiali che compongono la chiusura e la disomogeneità degli stessi non hanno permesso di effettuare un calcolo secondo le procedure indicate dalla normativa per il calcolo analitico. Pertanto il calcolo della trasmittanza termica è frutto di una ponderazione analitica del comportamento energetico dei singoli materiali in base ad una percentuale, teorica, di estensione del materiale all'interno della stratigrafia. La percentuale di materiale è stata ipotizzata in base allo studio della letteratura e delle fonti per quanto riguarda la composizione delle chiusure verticali antiche. Senza un rilievo accurato, ma al contempo invasivo, non è possibile stabilirne il reale peso in termini di estensione. Per questo tipo di strutture è, altresì impossibile, stabilire per via analitica i profili di temperatura e umidità della parete.

7.7.2. Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione: caratterizzazione degli scambi termici

Come è stato fatto nell'analisi dei metodi semplificati, anche per la verifica del metodo di calcolo analitico standardizzato, sono stati presi in considerazione gli scambi termici.

La definizione degli scambi termici dipende dalla bontà della descrizione dell'ambiente attraverso cui avviene lo scambio termico. Nel caso del solaio a terra (*scambi termici con il terreno*), il metodo standardizzato prevede di calcolare lo scambio termico a seconda che questo sia *controterra* o su *spazio aerato*, descrivendo per entrambi i casi le caratteristiche tecnologiche di tutti gli elementi coinvolti. Come per la caratterizzazione termica dei componenti, anche per questo punto del calcolo, la conoscenza della reale conformazione del pacchetto di chiusura inferiore è fondamentale per ottenere un risultato quanto più possibile corretto, ma è altrettanto complicato che per la caratterizzazione dell'involucro.

Per esempio, la zona termica B di Palazzo Scacerni Sisti poggia su una struttura in voltine di laterizio.

³² Studio integrato per il Borgo storico di Apice Vecchia. Strategie progettuali per l'efficientamento energetico e l'integrazione di sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili - Centro Ricerche Architettura>Energia in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra – Università degli studi di Ferrara. Responsabili scientifici prof. P. Davoli, A. Rinaldi (Dipartimento di Architettura) e prof. A. Caputo (Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra), 2012. Lo studio ha costituito parte integrante dell'attività di ricerca del dottorato di ricerca concluso. Coordinatrice operativa della ricerca: Paola Boarin.

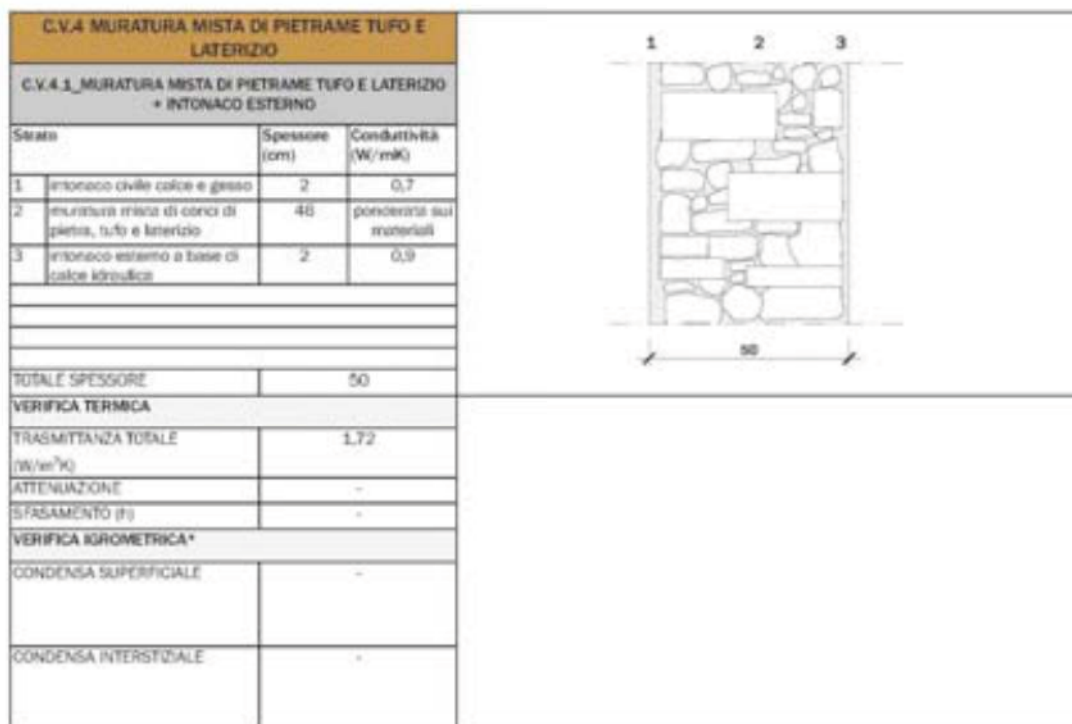


Figura 7.32. Estratto dello *Studio integrato per il Borgo storico di apice Vecchia*. Schede tecnologiche redatte per lo studio relativa alla chiusura verticale del tipo *muratura a sacco mista di pietrame e tufo*. La conduttività relativa allo strato di pietrame e tufo è stata ottenuta attraverso una ponderazione delle caratteristiche termiche, teoriche, dei materiali impiegati.

Nel calcolo dell'indice di prestazione energetica fatto per le simulazioni, il solaio è stato interpretato come *su spazio aerato*, utilizzando le indicazioni date dalla normativa per questa tipologia di chiusura. Questo elemento, però, differisce da un solaio su spazio aerato di nuova costruzione e molti degli elementi coinvolti (come l'altezza del piano aerato per esempio) non sono noti. Pertanto, il valore calcolato è il più corretto possibile, ma difficilmente rappresenterà la situazione reale.

Un discorso simile si può fare per la caratterizzazione degli scambi termici con ambienti non climatizzati. Come descritto nel *paragrafo 7.5.5* gli scambi termici con ambienti non climatizzati si calcolano attraverso la definizione di un parametro di correzione $b_{tr,x}$ secondo l'equazione (18).

Questo significa che, per descrivere correttamente gli scambi termici con ambienti non climatizzati è necessario, secondo il metodo analitico standardizzato, definire correttamente le caratteristiche dell'elemento di confine tra l'ambiente climatizzato e quello non climatizzato (parete o solaio limitrofi) e le caratteristiche tecnologiche dell'ambiente non climatizzato. Da queste caratteristiche, infatti, dipende la temperatura dell'ambiente non climatizzato che viene influenzata dalla temperatura esterna e dalla capacità termica degli elementi tecnologici che definiscono l'ambiente.

.....

Anche in questo caso, la principale difficoltà si riscontra nella definizione dell'involucro che descrive sia l'ambiente climatizzato sia quello non climatizzato. La situazione è ancora più difficile nei casi in cui l'ambiente di confine non sia visibile, come un sottotetto, celato alla vista da un controsoffitto, per esempio, in arellato con affreschi o decori che non permettono sondaggi per valutare correttamente la reale stratigrafia del pacchetto di copertura e il volume del sottotetto, o una grotta interrata, costituita da cunicoli di roccia che si diramano sotto l'edificio. Anche in questo caso è necessario rifarsi allo studio della letteratura, senza la certezza di aver ottenuto un dato realmente corretto.

7.7.3. Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione

Il tema della ventilazione naturale non è stato affrontato nell'analisi dei sistemi di calcolo semplificati perché in tali strumenti esso è determinato, come nel metodo analitico, in base alla destinazione d'uso dei fabbricati. Pertanto, per le simulazioni dei casi studio, il valore impostato è stato sempre di 0,3 vol/h per tutti gli edifici, supponendo una destinazione residenziale per tutti, come indica la normativa (UNI TS 11300-parte1) in questi casi.

In generale, negli edifici ci sono tre flussi d'aria prevalenti che provocano un incremento dello scambio termico per ventilazione: infiltrazioni, flussi con gli ambienti confinanti e ventilazione forzata.

Al termine *infiltrazione* si associano tutti gli ingressi d'aria provenienti dall'esterno e questi possono essere suddivisi in due categorie, le infiltrazioni d'aria incontrollabili, sia attraverso le tenute dei serramenti sia tramite l'involucro edilizio stesso e gli ingressi d'aria desiderati, attuati con l'apertura di porte e finestre (generalmente definiti con l'espressione *ventilazione naturale*).

La ventilazione naturale si contrappone alla ventilazione forzata solo per il modo adottato per effettuare il ricambio d'aria, che avviene tramite apparecchiature meccaniche nel secondo caso.

Negli edifici analizzati, e in generale per quanto riguarda la trattazione proposta, non sarà valutato il metodo di computazione della ventilazione meccanica perché, come per gli altri tipi di impianto (climatizzazione e produzione di acqua calda sanitaria), esso non è direttamente legato alla tecnologia dell'edificio storico e non è specifico di questa ricerca. Verrà posta attenzione alle *infiltrazioni* (intese sia come accidentali sia come ingressi d'aria dall'esterno voluti).

Valutando l'edificio allo stato di fatto, si analizza la prestazione energetica residua degli elementi che costituiscono l'involucro. In essi sono inclusi, perciò, anche tutti i componenti tecnologici che nel tempo hanno visto decrescere le proprie prestazioni termiche o che sono stati realizzati in epoche in cui i livelli prestazionali erano molto diversi dagli attuali. Si fa riferimento, per esempio, ai serramenti originali, che non presentano né taglio termico né guaine per la sigillatura delle infiltrazioni, e ai camini, molto diffusi negli edifici storici. La quantità di aria che entra accidentalmente attraverso vecchie porte o finestre o le

canne fumarie aperte dei camini è difficilmente quantificabile se non attraverso specifici rilievi sul campo. Uno di questi è il *blower - door test* che prevede di montare all'interno del telaio di una porta un ventilatore che immette aria nell'edificio. Al ventilatore sono collegati degli strumenti che misurano la differenza di pressione e l'intensità del flusso d'aria. La velocità di rotazione del ventilatore è regolata in modo tale da generare una determinata differenza di pressione tra l'interno e l'esterno. Di conseguenza, si induce un flusso d'aria che compensa le perdite di differenza di pressione dovute alle infiltrazioni. Il flusso d'aria misurato viene diviso per il volume dell'edificio. Questo valore può essere utilizzato per avere una caratterizzazione dell'ermeticità dell'edificio oggetto di studio³³.

Senza un rilievo energetico di questo tipo non è possibile definire a priori gli scambi termici per ventilazione in un edificio storico. Se esso presenta serramenti sostituiti in epoche recenti e un involucro apparentemente omogeneo e senza spifferi, il valore potrà verosimilmente avvicinarsi agli 0,3 volumi/ora indicati dalla normativa. Altrimenti, con tutta probabilità, questo valore sarà maggiore. Non è possibile, però, stabilire in via teorica tale dato.

Oltre alla presenza di infiltrazioni d'aria accidentali, dovute al decadimento delle prestazioni di tenuta dell'involucro edilizio, in un edificio storico possono esserci anche numerosi sistemi di ventilazione naturale non accidentali. In passato, in particolare tra il Cinquecento e l'Ottocento, gli architetti progettavano, per i propri fabbricati, dei sofisticati sistemi di ventilazione passiva, per il raffrescamento estivo degli ambienti di ricevimento. Questo significa che, celati all'interno dell'involucro edilizio, possono nascondersi delle canalizzazioni che portano, attraverso griglie e bocchette, l'aria dall'esterno e dai locali ipogei nelle stanze dei piani nobili. Se il sistema non è stato chiuso nel tempo, è possibile che possa funzionare ancora e, oltre a portare un beneficio nella stagione estiva, può rappresentare, in quella invernale, un punto di dispersione termica per ventilazione. Per questo è importante fare un accurato rilievo energetico e architettonico prima di avviare un calcolo di simulazione energetica su cui si baserà l'intero progetto di riqualificazione. Una volta individuato, però, non è detto che sia semplice descriverlo energeticamente, come prevede il calcolo analitico.

7.7.4 Conclusioni dell'analisi del metodo di calcolo standardizzato

La mancanza di specifici strumenti per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici antichi porta ad applicare la normativa generale (UNI TS 11300) anche al patrimonio storico, senza tener conto di alcune caratteristiche tecnologiche e morfologiche dell'edificio antico, che invece possono renderne particolarmente difficile il calcolo del comportamento energetico, per una corretta progettazione degli

³³ Durante il periodo di *visiting scholar* presso l'Università di Nottingham, *Departement of the Built Environment* si è partecipato attivamente ad uno di questi test, verificandone le reali possibilità di impiego, i tempi di rilievo e i costi.

interventi.

Il problema maggiore, come si è visto, risiede nella difficoltà di conoscere la composizione reale dell'involucro storico, in particolare nelle situazioni di maggior pregio dove non è nemmeno possibile eseguire piccoli sondaggi investigativi. Questo implica l'impossibilità, in numerosi casi, di applicare il metodo analitico standardizzato in maniera completa e precisa, rischiando di pregiudicare il risultato finale. L'eterogeneità del paramento murario rende estremamente difficile una stima attendibile della trasmittanza delle pareti, perché in molti casi esse sono realizzate con laterizi di diversa natura, con la presenza di intercapedini vuote o tessiture miste. Un altro aspetto difficile da considerare è la presenza di ponti termici nelle frontiere, quali il distacco infisso-muro, canne fumarie nascoste, interventi di restauro precedenti, controsoffitti celati da opere di decoro o la presenza di locali *buffer* (cantine e sottotetti) che possono causare variazioni dinamiche alle condizioni che governano gli scambi termici. Solo quando l'edificio è dotato di un proprio sistema di riscaldamento, (caso non molto diffuso) è possibile individuare tali caratteristiche con l'ausilio di termografie. Una volta individuate, però, la caratterizzazione termica degli elementi individuati è possibile solo attribuendo alla scala cromatica della termocamera un valore di capacità termica dei materiali fotografati. Questo valore è rintracciabile dalle schede dei materiali, in caso di strutture recenti, ma non è possibile per materiali antichi. In questi casi bisogna affidarsi soltanto allo studio delle fonti e procedere per analogia con casi simili. Questo non è sempre possibile.

I risultati di questa seconda parte dell'analisi hanno indotto la ricerca a sviluppare un sistema alternativo, rispetto a quelli esistenti, per il calcolo della prestazione energetica di un edificio storico da affiancare al metodo di calcolo analitico standardizzato. Questa idea si è tradotta nell'elaborazione di un *sistema di rilievo strumentale diretto*, che possa facilmente fornire il dato ricercato, a prescindere dalla conoscenza di tutti i dati necessari al calcolo tramite metodo analitico standardizzato. Nel *capitolo 8* sono descritte le prime prove sperimentali per la messa a punto di questo strumento di rilievo.

Capitolo 8. Sperimentazione: rilievo energetico strumentale

L'applicazione ai casi studio dei diversi metodi di calcolo proposti dalla normativa ha messo in luce i limiti degli strumenti semplificati e le difficoltà di descrivere correttamente, come richiede il metodo analitico standardizzato, le caratteristiche termiche dell'edificio storico per la stima delle sue prestazioni energetiche. Questi risultati hanno orientato la ricerca verso l'ideazione di uno strumento alternativo e complementare ai metodi analitici, che permetta la stima delle prestazioni energetiche dell'involucro attraverso un rilievo diretto dell'edificio, a prescindere dalla necessità di descrivere accuratamente tutti i componenti dell'involucro edilizio. Il presente capitolo, pertanto, affronta la parte sperimentale della ricerca, volta alla messa a punto di questo nuovo strumento di rilievo. Di seguito sono presentati i risultati dei test svolti.

8.1. Calcolo del comportamento energetico reale dello stato di fatto di un edificio

8.1.1. Obiettivo della sperimentazione: *Diagnosis of a Real Housing Envelope (DRHouseE)*

Come si è dimostrato nei capitoli precedenti, la valutazione energetica e ambientale di un edificio storico è resa particolarmente difficile sia da una normativa non specifica per la tipologia edilizia in esame, sia da alcune caratteristiche tecnologico-morfologiche dell'edificio antico che ne condizionano fortemente il comportamento energetico, soprattutto in riferimento agli scambi termici per trasmissione e ventilazione ($Q_{H,tr}$ e $Q_{H,ve}$).

La sperimentazione deriva proprio dalla dimostrazione che il metodo analitico standardizzato presenta dei limiti se applicato all'edilizia storica, derivanti dall'impossibilità di conoscere tutti i dati di *input* necessari a compiere un calcolo attendibile.

L'obiettivo primario della sperimentazione è elaborare un sistema di acquisizione ed elaborazione dati studiato *ad hoc* per l'edilizia storica, che permetta un rilievo energetico dell'edificio direttamente *in situ*. Il modello di rilievo, *Diagnosis of a Real Housing Envelope (DRHouseE)*, è stato elaborato in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara, che ha contribuito in particolare per la fase di acquisizione dati e supporto scientifico per gli aspetti termofisici¹. Obiettivo finale delle sessioni sperimentali è quello di descrivere un metodo di rilievo che possa fornire un'affidabile alternativa, speditiva e semplificata, al metodo analitico definito da normativa, da utilizzarsi in tutti quei casi, come quelli dell'edilizia storica, in cui anche questo metodo di calcolo mostra una affidabilità non assoluta. La possibilità di una duplice procedura di indagine, analitica e speditivo-empirica, potrà, auspicabilmente,

¹ Referenti scientifici per il Dipartimento di Fisica Nucleare sono stati il dott. Mirco Andreotti e il dott. Gianluigi Cibinetto.

permettere di verificare, ed eventualmente quantificare, il livello di approssimazione che si raggiunge con il calcolo standardizzato e con i metodi semplificati. Tale strumento avrà alla fine una duplice utilità, sia sul piano operativo sia su quello sperimentale.

Sul piano operativo, potrà fornire in tempi rapidi e senza richiedere operazioni invasive sull'edificio, il valore di coefficiente globale di scambio termico attraverso il quale calcolare facilmente gli scambi termici per trasmissione ($Q_{H,tr}$). Il sistema di rilievo consente di definire la domanda energetica dell'edificio attraverso un procedimento che parte dal generale e arriva al particolare. Infatti, per definire il comportamento e il fabbisogno energetico dell'edilizia storica non si ritiene opportuno utilizzare il metodo "bottom up", che basa il calcolo sulla definizione del particolare (valutazione del comportamento energetico dei singoli componenti edilizi) per trasporre i risultati al generale per l'individuazione dell'indice di prestazione energetica dell'edificio; si ritiene che possa essere più appropriato, invece, individuare il comportamento dell'edificio in termini globali e da questo risultato trarre i valori dei singoli componenti edilizi (metodo "top down"). Questo permette di limitare il peso dei singoli errori che si commettono nella descrizione degli elementi edilizi presi singolarmente, nel momento in cui non si abbiano sufficienti dati per una loro caratterizzazione accurata.

Il dato rilevato permetterà, prima di tutto, di stabilire se l'intervento di riqualificazione energetica del fabbricato storico sia effettivamente necessario, in base al reale comportamento energetico di tale edificio. La filosofia su cui si basa il lavoro è di dare al progettista uno strumento di indagine quanto più preciso possibile per permettergli di verificare la necessità e il possibile grado dell'operazione per eliminare provvedimenti inutili o dannosi alla conservazione dei valori testamentari del manufatto. In secondo luogo, il dato ottenuto sperimentalmente, permetterà di progettare opportunamente la componente impiantistica, calibrandola sul reale fabbisogno energetico dell'edificio, senza correre il rischio di sottostimare gli apparati rischiando di creare *dis-comfort* nei locali o, peggio, di sovradimensionarli, incorrendo nei problemi di integrazione architettonica tipici dei progetti in ambienti di pregio.

Sul piano sperimentale, può rappresentare un valido strumento di prova per la messa a punto di metodi di calcolo semplificati specifici per l'edilizia storica, a partire da quelli vigenti e usati oggi per l'edilizia di nuova progettazione ed esistente non storica. Il dato ottenuto attraverso il rilievo strumentale può essere utilizzato per verificare quello ottenuto analiticamente attraverso i metodi di calcolo proposti specificatamente per la valutazione energetica dell'architettura storica.

Le prove sperimentali non sono ancora concluse perché richiedono un periodo di elaborazione più lungo di quello del dottorato (i risultati finali faranno parte del proseguimento della ricerca), pertanto nel capitolo sono presentati i risultati preliminari dei test.

Le prime idee per l'elaborazione di questo nuovo strumento di diagnosi sono nate grazie all'esperienza presso l'Università inglese di Nottingham, dove hanno grande esperienza nel campo della riqualificazione energetica e nella sperimentazione sul campo. Questa esperienza all'estero, è stata fondamentale per apprendere alcune tecniche di diagnosi utilizzate in Gran Bretagna e, successivamente, rielaborare il test per adeguarlo al caso dell'edilizia storica.

8.2. Esperienza presso la Nottingham University – Departement of Built Environment: Co-heating test.

Il mese di Novembre del primo anno di dottorato (2010) è stato trascorso, come *visiting scholar*, presso la *School of the Built Environment*, della *University of Nottingham*², Gran Bretagna, dove, grazie al Prof. Mark Gillott, è stato possibile assistere e collaborare attivamente ad una sperimentazione nell'ambito della ricerca *Creative Energy Homes*³, con l'esperimento svolto sulla *EON House* (Figura 8.1).



Figura 8.1. La EON House, uno degli edifici residenziali sperimentali costruiti nel campus della University of Nottingham (progetto *Creative Energy Homes*). L'edificio è stato oggetto di un test sperimentale per la valutazione della prestazione energetica dell'involucro (*coheating test*).

² School of the Built Environment, Univeristy of Nottingham. www.nottingham.ac.uk/engineering/departments/abe.

³ Creative Energy Homes. www.creative-energy-homes.co.uk.

.....

All'interno del *campus* principale dell'Università di Nottingham sono stati realizzati sei edifici residenziali costruiti secondo criteri di innovazione e flessibilità, per permettere la verifica dei moderni aspetti della costruzione architettonica, tra cui la progettazione morfologica, l'utilizzo di diversi materiali di rivestimento, strutture di copertura, di fondazione, componenti vetrate, sistemi per la climatizzazione, tecnologie per la produzione di energia da fonte rinnovabile, sistemi di illuminazione, ecc. Il complesso di abitazioni sperimentali serve a descrivere i diversi scenari di *performance* nell'edilizia residenziale inglese, da quello dello stato dell'arte a quelli di futura efficienza energetica.

Il progetto, denominato *Creative Energy Homes*, ha l'obiettivo di stimolare idee progettuali sostenibili e promuovere nuovi modi per garantire case ecosostenibili ed economicamente convenienti.

Il progetto è stato finanziato da molteplici soggetti tra cui Stoneguard, Roger Bullivant Ltd, EON, BASF, Tarmac, Saint-Gobain. Gli edifici sono stati realizzati grazie alla collaborazione tra queste aziende del settore edilizio e un gruppo di progettisti della *School of the Built Environment*, composto dall'Arch. Guillermo Guzman e dal Prof. Mark Gillott guidati dal Prof. Saffa Riffat. Gli studenti iscritti al triennio del corso di laurea partecipano alla costruzione delle sei abitazioni, mentre gli studenti di dottorato conducono test e ricerche di carattere energetico abitando direttamente all'interno dei fabbricati studiati.

L'esperimento a cui si è preso parte attivamente è chiamato *Whole House Heat Loss Test Method (Coheating test)*⁴ e rappresenta un metodo di valutazione strumentale delle prestazioni energetiche. Esso è stato messo a punto e testato per la prima volta dal *Centre for the Built Environment (CeBE)* della *Leeds Metropolitan University (LMU)*⁵.

Il *coheating test* è un metodo che misura lo scambio termico verso l'esterno [W/K] (sia perdite per ventilazione che per infiltrazione/ventilazione accidentale) in un edificio non occupato. Lo svolgimento è relativamente semplice. Si tratta di riscaldare elettricamente un fabbricato (o un singolo locale) con stufe elettriche fino ad una temperatura media piuttosto elevata (tipicamente 25 °C, in modo da assicurare un ΔT sufficiente, pari ad almeno 10 K tra interno ed esterno) per un determinato periodo (da 1 a 3 settimane). Misurando la quantità di energia elettrica necessaria ogni giorno per mantenere l'edificio alla temperatura desiderata, può essere determinato il fabbisogno termico giornaliero (in Watt) dell'edificio. Le perdite di calore si possono dunque osservare su un grafico con il fabbisogno termico giornaliero sull'asse delle ascisse e il relativo ΔT su quello delle ordinate. La curva risultante rappresenta il coefficiente globale di scambio termico dell'edificio [W/K] (*Figura 8.2*).

⁴ Whole House Heat Loss Test Method (Coheating). www.lmu.ac.uk/as/cebe/projects/coheating_test_protocol.pdf

⁵ Centre for the Built Environment, Leeds Metropolitan University. www.leedsmet.ac.uk/as/cebe

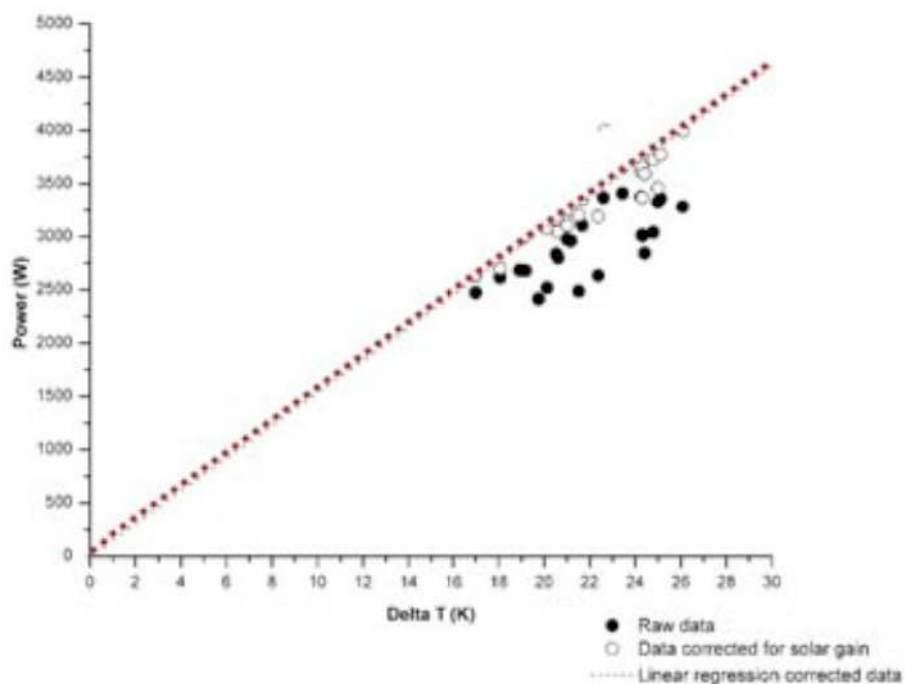


Figura 8.2. Il grafico rappresenta l'*output* di acquisizione del *coheating test*. Sull'asse delle ordinate ci sono i dati di temperatura rilevati, mentre sull'asse delle ascisse la potenza di riscaldamento. Il *fit* dei dati deve dare la retta indicata in rosso nel grafico.

Il test permette, infatti, di determinare il coefficiente globale di scambio termico senza conoscere le specifiche tecnologiche dell'involucro edilizio. Con questo metodo è possibile determinare la "trasmissanza termica globale" dell'involucro e l'incidenza dei ponti termici delle strutture.

Come si accennava in apertura, il test è stato sperimentato, a Nottingham, sulla *EON HOUSE*. La *figura 8.3* illustra alcune fasi del test.



Figura 8.3. Le fasi del *coheating test*, sperimentato nella *EON House* nel campus dell'Università di Nottingham. In alto, le analisi termografiche interne (una bocchetta di mandata dell'impianto di ventilazione meccanizzata) ed esterne (fronte Sud); in centro le necessarie operazioni di chiusura delle prese d'aria (una bocchetta di ventilazione e un camino); in basso le fasi di montaggio dell'attrezzatura e un locale della casa pronto per il test.

L'applicazione di questo strumento di rilievo da parte della *Leeds Metropolitan University* (LMU) mostra un divario fra i risultati previsti da simulazioni analitiche e quelli direttamente rilevati sul caso reale⁶, mettendo in evidenza l'importanza di usare un test simile per conoscere il comportamento energetico di un edificio con approssimazioni ed errori molto inferiori. Il grafico in *figura 8.4* e la *tabella 8.1* mostrano il *gap* fra i due risultati (previsione analitica semplificata e rilievo): le perdite di calore calcolate erano stimate intorno ai 75,2 W/K, mentre lo scambio termico rilevato è di 153,4 W/K, cioè 78,2 W/K di più del valore predetto (104% di differenza).

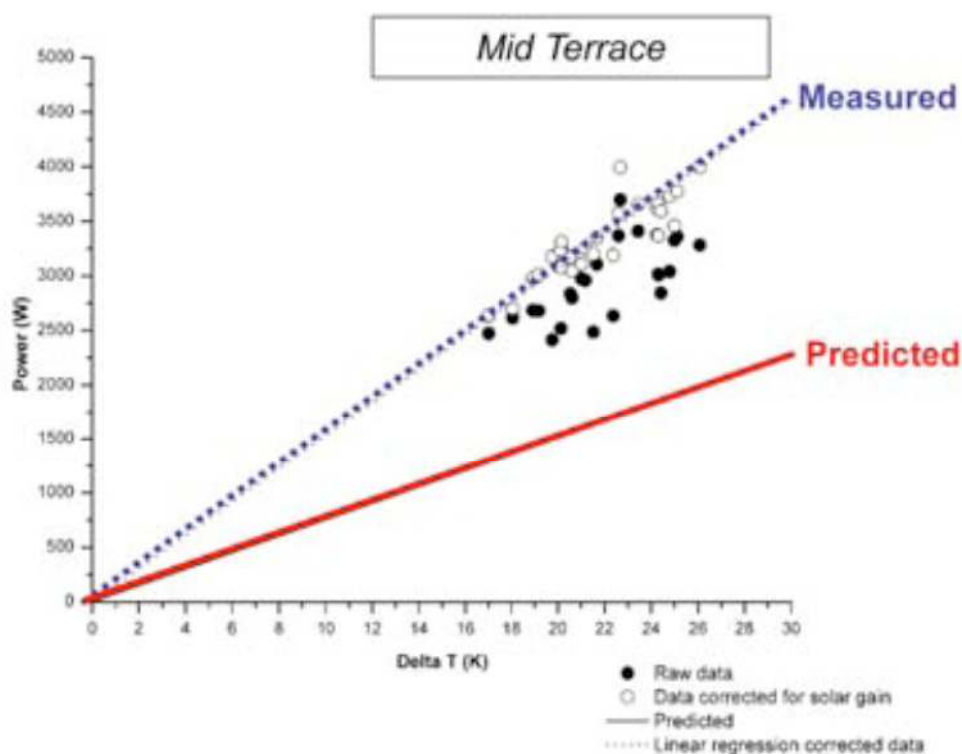


Figura 8.4. Il grafico mette a confronto i valori di scambio termico globale stimati (in rosso) e quelli realmente rilevati sul caso studio (in blu).

⁶ *Leeds Metropolitan University* (LMU): Johnston D., (Buildings and Sustainability Group Centre for the Built Environment (CeBE)), *Fabric testing: Technical approaches and process, Results from recent case studies – Stamford Brook*, in *EcoBuild*, Earls Court London, 2-4 Marzo 2010.

Dwelling Type	Predicted Fabric Heat Loss (W/K)	Ventilation Heat Loss from Pressure Test Results (W/K)	Predicted Total Heat Loss (W/K)	Measured Heat Loss (W/K)	Measured Heat Loss - Adjusted for Solar Gain (W/K)
Semi	50,6	13,2	63,8	105,4	111,7
Mid Terrace	54,9	20,3	75,2	136,3	153,4

+75%

+104%

Tabella 8.1. Nella tabella sono messi a confronto i dati relativi alle perdite di calore attraverso l'involucro e per ventilazione, nel caso simulato e in quello reale. In entrambi gli ambienti presentati si riscontra una sensibile differenza fra i due dati (75% di differenza nel primo e 104% nel secondo).

Il principale risultato del *Coheating test* è che si può ottenere in breve tempo (massimo 4 settimane) il valore di scambio termico globale di un edificio anche senza conoscerne tutte le caratteristiche tecnologiche di involucro e con un'approssimazione molto migliore rispetto al valore ottenuto attraverso il calcolo analitico semplificato.

La sperimentazione del test in prima persona a Nottingham ha suggerito la possibilità di esportare il test di rilievo, mettendo a punto le modifiche necessarie per poterlo applicare all'edilizia storica.

8.3. Setup sperimentale

È fondamentale chiarire la particolare grandezza che si vuole analizzare con la sperimentazione. Al coefficiente globale di scambio termico, espresso in W/K, contribuiscono tutti gli *i-esimi* elementi che compongono l'involucro e la struttura interna dell'edificio, ognuno di essi caratterizzato da una propria trasmittanza termica U_i (espressa invece in W/m^2K).

Il coefficiente H_{g_i} non è riferito solo allo scambio termico dell'involucro in sé, ma comprende la globalità dello scambio termico fra interno ed esterno dell'edificio, comprese, pertanto, sia le perdite per trasmissione attraverso l'involucro sia quelle per ventilazione, causate da infiltrazioni d'aria.

Il test consiste nello scaldare, attraverso una resistenza elettrica, un ambiente confinato, rilevando la temperatura dell'aria interna e la temperatura esterna. L'uso di una fonte di riscaldamento elettrica permette di conoscere la reale quantità di calore che viene utilizzata per scaldare l'ambiente, dal momento che tutta l'energia elettrica fornita si trasforma in energia termica, senza perdite, come avviene invece con altri sistemi di riscaldamento.

Dal momento che l'obiettivo è mettere a punto un sistema di rilievo che possa fornire un risultato più corretto di quello ottenuto analiticamente, è necessario stabilire quale sia la tecnica di misura e di elaborazione dati che meglio descriva il comportamento dell'edificio, senza commettere errori di interpretazione che comprometterebbero la buona riuscita del rilievo stesso. Il problema principale legato all'uso del modello analitico risiede nell'impossibilità di conoscere la composizione dell'involucro, pertanto, sono stati costruiti due modelli di studio in scala, su cui fare le prime prove del test. I due modelli in scala, infatti, a differenza di un edificio reale, sono noti, cioè di essi si conosce perfettamente la stratigrafia dell'involucro, la capacità termica dei materiali con cui sono costruiti e le dimensioni. Questo significa che il calcolo della prestazione energetica condotto con il metodo analitico standardizzato in questo caso è corretto e può essere utilizzato come valore di riferimento per la messa a punto del nuovo strumento di rilievo. Finché la tecnica di misura testata non dà lo stesso valore calcolato analiticamente, essa non può essere considerata accettabile. Una volta messa a punto la tecnica migliore essa è sicuramente valida e può essere utilizzata nei casi in cui il metodo analitico non possa essere utilizzato con la stessa sicurezza con cui lo si usa come riferimento per la descrizione del comportamento energetico dei modelli di studio. I due modelli di studio, pertanto, non sono stati costruiti e utilizzati per trarre conclusioni circa il comportamento energetico degli edifici storici perché non ne hanno le caratteristiche, ma soltanto per definire la correttezza del sistema di misura proposto. È necessario, infatti, individuare la tecnica di rilievo che fornisca il risultato di H_{gl} più prossimo al dato calcolato analiticamente grazie al metodo definito dalla normativa, prima di poter testare lo strumento definitivo su un edificio vero, molto più complesso.

Modello A (Figura 8.5)

Il primo modello di studio è stato realizzato con pannelli in polistirene da 2 cm di spessore, che formano un box di 0.5 m di lato. Questo modello di analisi serve a sperimentare il test su un volume di cui si conoscano esattamente le caratteristiche tecnologiche e termiche e che permetta di svolgere alcuni test in laboratorio, dove la temperatura "esterna", così come i guadagni solari, possono essere controllati nel tempo. Di questo modello è stato possibile variare lo spessore delle pareti per eseguire test comparativi. Il valore di $H_{gl,cal}$ calcolato con metodo analitico standardizzato è pari a 1,47 W/K, nella configurazione con pareti di 2 cm, e 0.85 W/K nella configurazione con pareti di 4 cm.

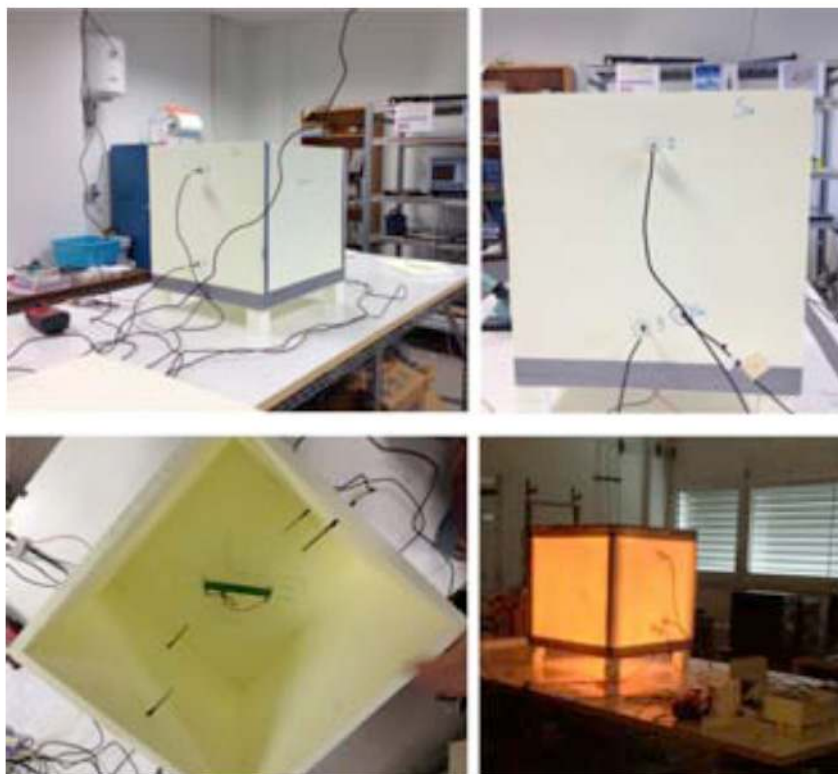


Figura 8.5.
Immagine del modello A di studio, configurazione con parete da 2 cm. Il test in laboratorio è stato eseguito presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Ferrara.

Modello B (Figura 8.6)

Il secondo modello è una casetta in scala (volume lordo pari a circa 3.5 m³), costruita appositamente per l'esperimento con materiali e tecniche tradizionali⁷. Le chiusure verticali sono realizzate in mattoni pieni di recupero, la copertura è realizzata con travicelli in legno, un tavolato in legno e rivestimento esterno in coppi in laterizio di recupero. Il piccolo "edificio" è stato posizionato sotto un portico, in modo che gli apporti solari (dovuti a irraggiamento diretto) potessero essere il più possibile controllabili, essendo limitati a quelli ricevuti in poche ore nella giornata e sul solo lato esposto a sud (prospetto principale). In questo caso si potrà operare una sottrazione dei guadagni solari, calcolati in via analitica, dai dati rilevati dalle sonde.

Il valore di $H_{gl,cal}$ calcolato analiticamente è pari a 18 W/K.

⁷ Questo secondo modello è costruito con materiali tradizionali con lo scopo di creare condizioni termiche più complesse rispetto al cubo in polistirene (per esempio con maggiore inerzia termica). L'utilizzo di questo modello non ha la finalità di trarre conclusioni circa il comportamento energetico di un edificio storico, ma serve solo a mettere a punto lo strumento di rilievo e il sistema più corretto per l'analisi dei dati. Il modello è stato costruito a titolo gratuito da Edil A.R.V.A. Impresa edile e lavori pubblici di Ferrara.



Figura 8.6.

Immagine del modello B di studio, posto sotto il portico del giardino della Facoltà di Architettura di Ferrara. Nella terza immagine è rappresentato un particolare della porta in polistirene removibile. Questo pannello, utilizzato durante l'acquisizione, viene protetto dalle intemperie quando il test non è in funzione, attraverso una porta in legno (quarta immagine)

Per effettuare i test è stata predisposta la seguente attrezzatura:

- 6 sonde di temperatura: termoresistenze al platino tipo PT100 Classe B a doppio isolamento con precisione inferiore a 0.5 °C. (2 per il rilievo della temperatura esterna e 4, posizionate ad altezze differenti, come suggerito in letteratura⁸, per quella interna);
- una ventola, per distribuire uniformemente il calore all'interno del volume riscaldato;
- una lampada da 250 Watt ciascuna, o una resistenza elettrica, come sistema di riscaldamento;
- un dispositivo ICP CON I-7000, il quale esegue la misura della resistenza della sonda PT100, elabora il dato e restituisce al pc il valore della temperatura corrispondente. Questo

⁸ Dario Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage*, «Developments in Atmospheric Science 23», Amsterdam, 1998.

dispositivo esegue la "lettura" della sonda in modalità a 3 fili⁹ e comunica con il computer via seriale. Quindi il sistema di acquisizione dati e di controllo funziona direttamente sul computer, sul quale vengono anche registrati tutti i dati rilevati. Il *software* di controllo e acquisizione dati è realizzato con *Labview*¹⁰ della *National Instruments*. Tutte le temperature vengono registrate ogni secondo¹¹.

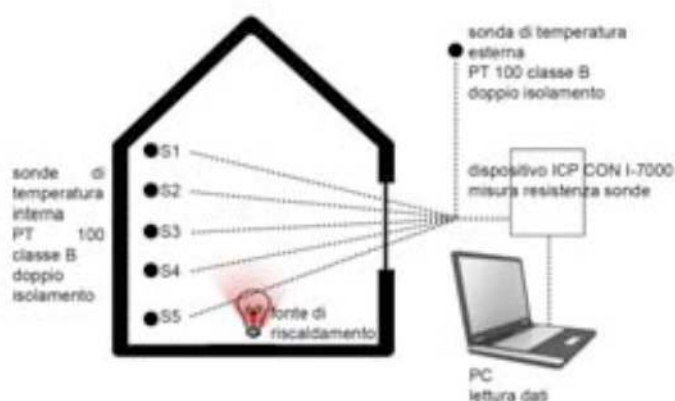


Figura 8.7.
 Nell'immagine è schematizzato il funzionamento del sistema di acquisizione dati durante il rilievo.

Il sistema di acquisizione ed elaborazione dati è stato sviluppato insieme al dott. Mirco Andreotti del Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Ferrara. L'elaborazione del sistema informatico di supporto al rilievo ha permesso, parallelamente, di attivare una tesi di laurea in informatica¹² con l'obiettivo di mettere a punto un'applicazione di *LabView* ad interfaccia *user friendly*, attraverso la quale si potesse gestire tutto il processo di rilievo sui modelli di studio. In *figura 8.8* è riportata un'immagine dell'interfaccia del sistema di acquisizione.

L'applicazione è strutturata come una macchina a stati finiti, che dà la possibilità all'utente di effettuare

⁹ Esistono tre modalità principali di lettura, a 2, 3 e 4 fili. La lettura a 3 fili ha una precisione a metà tra la 2 che è la meno precisa e la 4 che è la più precisa. Comunque la precisione di misura dello strumento è dello 0.05%, quindi al di sotto della precisione intrinseca delle sonde.

¹⁰ *LabView* è l'abbreviazione di *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*. È l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale di *National Instrument*. Viene utilizzato principalmente per acquisizione e analisi dati, controllo di processi, generazione di rapporti o più generalmente per tutto ciò che concerne l'automazione industriale su diverse piattaforme.

¹¹ Tutta la strumentazione e il supporto tecnico alla raccolta dati è stato fornito dal Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Ferrara (dott. Mirco Andreotti e dott. Gianluigi Cibinetto).

¹² Tesi di laurea di Caterina Sassoli, *Sviluppo di un sistema di test per lo studio di scambi termici negli edifici*, relatori dott. Mirco Andreotti, dott. Gianluigi Cibinetto, Dipartimento di Informatica, Università degli studi di Ferrara, 2012.

una serie di scelte per ottenere un'adeguata rilevazione delle temperature.

Gli stati della macchina sono:

- inizializzazione;
- configurazione;
- acquisizione;
- simulazione;
- elaborazione.

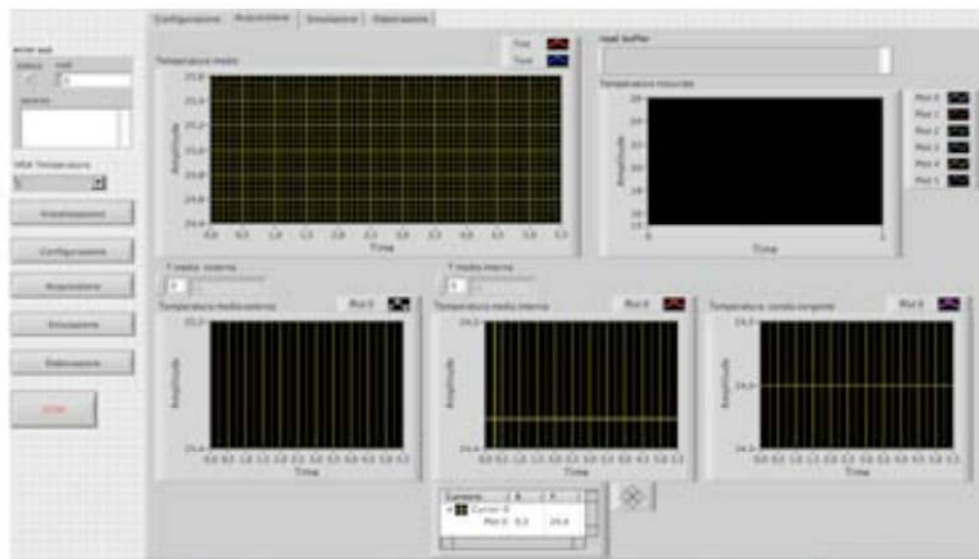


Figura 8.8. Interfaccia del programma: stato di acquisizione dati. Nel riquadro in alto a sinistra è visualizzata la curva di riscaldamento/raffreddamento costituita dal valore medio rilevato dalle sonde insieme alla temperatura media esterna. Il grafico in alto a destra mostra tutte le temperature rilevate da ogni sonda, sia interna sia esterna. Nei grafici sotto, partendo da sinistra, compare la curva relativa alla temperature media esterne, la curva delle temperature medie interne e la temperatura rilevata dalla sonda posta sulla sorgente di calore.

L'esperimento ha investigato tre diverse tecniche di misura strumentale dello scambio termico di un edificio, sui due modelli di studio:

1. curva di riscaldamento;
2. ΔT costante;
3. curva di inseguimento.



Figura 8.9. Nell'immagine sono riprese alcune fasi di acquisizione. In alto le fotografie illustrano momenti del rilievo nel giardino della Facoltà di Architettura, mentre l'immagine in basso riproduce l'interfaccia del programma in fase di acquisizione.

8.4. Tecniche di misura: test sui modelli di studio

8.4.1. Curva di riscaldamento – Modello A

Con il test “curva di riscaldamento” ci si propone di ricavare H_{gl} tramite l'analisi del transiente termico ottenuto riscaldando un ambiente fino a una temperatura il più possibile prossima a quella di equilibrio con l'esterno. Quello che ci si aspetta è un aumento della temperatura modulato dalle caratteristiche termiche dei vari componenti della struttura e dalla sua geometria. Per parametrizzare l'andamento reale viene usata la combinazione di più esponenziali le cui diverse costanti di tempo servono a descrivere le differenti componenti del sistema (e.g. aria, muri, ecc.). La differenza di temperatura con l'esterno risulta quindi:

$$\Delta t = P \times H_{gl} + A \times e^{-\frac{t}{\tau'}} + B \times e^{-\frac{t}{\tau''}} \times K \quad (1)$$

Dove:

P = potenza di riscaldamento;

H_{gl} = coefficiente globale di scambio termico;

A e B = due costanti di normalizzazione;

τ' e τ'' = costanti di tempo delle esponenziali.

Estraendo dai dati, tramite il metodo dei minimi quadrati (in seguito denominato *fit*), le costanti di tempo delle esponenziali e conoscendo la potenza erogata, è possibile calcolare il coefficiente di scambio termico.

Maggiori dettagli su queste tecniche di misura sono fornite sui registri di laboratorio presenti all'*Appendice C-1*.

Il test di riscaldamento è stato inizialmente testato sul box di polistirene (Modello A) poiché il sistema è molto ben definito e semplice da studiare. È stata usata come fonte di calore una resistenza elettrica di potenza $P_n = 18.9$ W. In *figura 8.9(A)* è riportata l'evoluzione temporale della temperatura interna ed esterna al cubo: si può notare che dopo circa due ore si raggiunge l'equilibrio attorno ai 45 K, mentre la temperatura esterna rimane praticamente inalterata. La *figura 8.9(B)* mostra il *fit* eseguito con il metodo descritto in precedenza: l'accordo con i dati è molto soddisfacente. Sono stati fatti due tipi di *fit*: uno considerando la temperatura esterna costante e l'altro considerando le, seppur piccole, variazioni di temperatura; in entrambi si rileva il coefficiente globale di scambio termico $H_{gl, ril} = 0.86$ W/K, un valore molto simile a quello calcolato $H_{gl, cal} = 0.85$ W/K.

La prova preliminare effettuata in laboratorio sul box di polistirene dà, quindi, come previsto, risultati piuttosto soddisfacenti. Il valore di $H_{gl, ril}$ rilevato è del tutto confrontabile con quello calcolato

analiticamente, pertanto è possibile esportare il metodo al secondo modello di studio, per testarlo in condizioni reali (variazione della temperatura esterna e apporti solari).

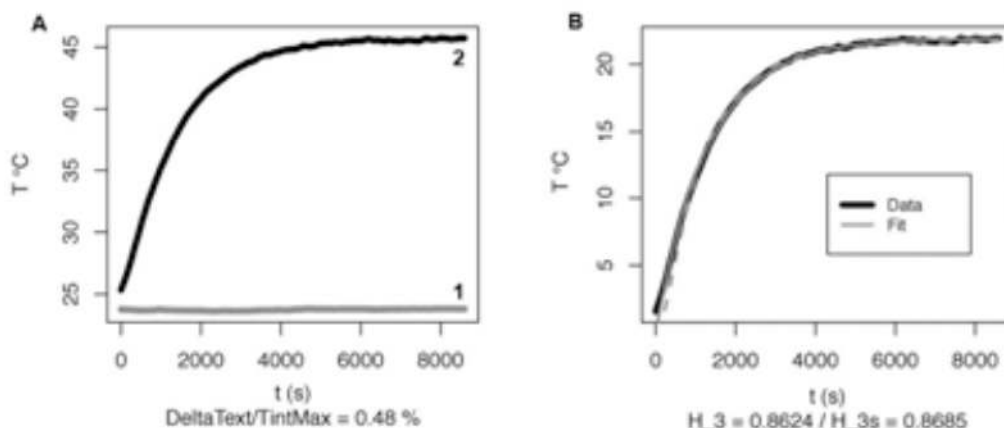


Figura 8.9. Grafici del test "Curva di riscaldamento" effettuato sul box con parete di 4 cm: il primo grafico (A) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature esterne (1) e la media delle temperature interne (2), il grafico (B) rappresenta il risultato del *fit* del rilievo.

Si rimanda all'Appendice C-2 per maggiori dettagli sui tutti i test svolti sul modello A per quanto riguarda la prima tecnica di misura testata.

8.4.2. Curva di riscaldamento – Modello B

L'acquisizione della curva di riscaldamento (con una lampada ad incandescenza da 250 W) ha avuto una durata di circa 8 ore ed è mostrata in figura 8.10(A).

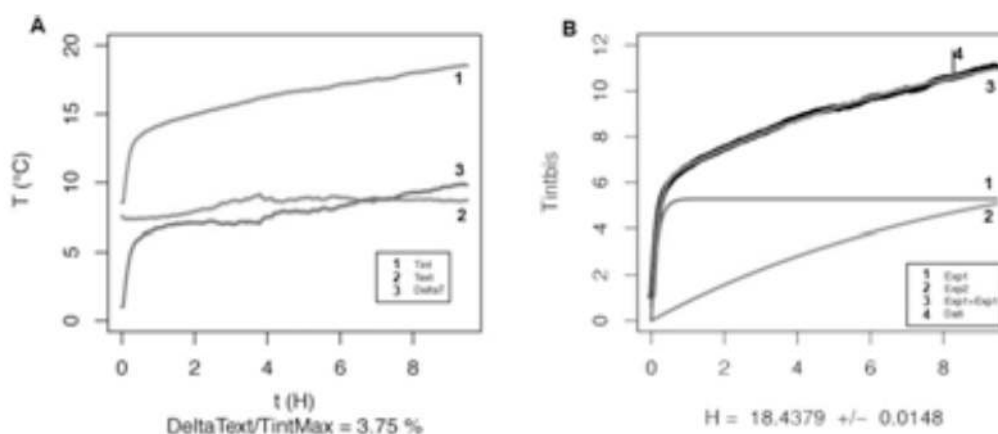


Figura 8.10: curva di riscaldamento sul modello B con $P_n = 250$ W, durata 8 ore: il grafico di sinistra (A) rappresenta il risultato del rilievo (1 media temperature interne acquisite, 2 media temperature esterne, 3 ΔT). Il grafico di sinistra mostra il risultato del *fit* con due esponenziali.

Si può notare che, anche dopo otto ore di riscaldamento, non si raggiunge l'equilibrio termico, mentre la temperatura esterna varia, seppur di poco, in maniera irregolare. Si può notare anche come l'innalzamento della temperatura interna sia modulato da due diverse costanti di tempo, infatti, nel caso di questo modello la capacità termica dei muri è circa 1000 volte quella dell'aria; per avere una buona qualità del *fit* quindi sono state usate due esponenziali. La misura eseguita prendendo in considerazione tutte le otto ore di acquisizione fornisce il valore $H_{gl,ril} = 18.4W/K$ rispetto a un valore calcolato $H_{gl,cal} = 18 W/K$. Pur raggiungendo un apparente buon risultato la tecnica di misura non è ancora di facile interpretazione e quindi non può essere considerata del tutto affidabile. Una delle ragioni prevalenti risiede proprio nel fatto che non si è raggiunto l'equilibrio termico. Ulteriori prove sono necessarie per migliorare la metodologia di misura con l'obiettivo di stabilire una procedura operativa che consenta di avvicinarsi il più possibile all'equilibrio, acquisendo per un periodo più lungo, oppure utilizzando una fonte di calore caratterizzata da maggiore potenza.

Si rimanda all'*Appendice C-3* per maggiori dettagli sui tutti i test svolti sul modello B per quanto riguarda la prima tecnica di misura testata.

In ogni caso la tecnica di misura testata si è rilevata più corretta sul primo modello di studio perché non tiene conto in maniera precisa della capacità termica dei muri condizionata dalla grande inerzia delle pareti. Questo aspetto è evidente con i test sul secondo modello (la casetta costruita con spessori di muratura molto elevati). Per questa ragione è stata sperimentata una seconda tecnica di misura. Infatti, l'obiettivo della sperimentazione è esportare l'idea di un rilievo strumentale studiata in Gran Bretagna al caso dell'architettura storica, adattandolo alle caratteristiche di questa tipologia edilizia. Una delle più significative dipende proprio dalla grande inerzia delle strutture.



Figura 8.11.
Alcune fasi dell'allestimento del test sul modello B. In alto a sinistra è rappresentata parte della strumentazione utilizzata.

8.4.3. Tecnica di misura con ΔT costante – Modello B

La tecnica di misura di H_{gt} con ΔT costante consiste nel controllare la sorgente di calore al fine di mantenere la differenza di temperatura tra interno ed esterno costante. Mantenere ΔT costante permette di acquisire dati in uno stato di “quasi equilibrio termico”, in quanto non vi sono variazioni importanti di ΔT . Il calcolo di H_{gt} diventa allora molto più semplice e dipende dalla equazione (2).

$$H_{gt} = \frac{(P_n \times D)}{\Delta t} \quad [\text{W/K}] \quad (2)$$

Dove:

P_n è la potenza in Watt,

D è il *Duty Cycle* del sistema di riscaldamento, ossia la frazione di tempo in cui esso rimane acceso,

ΔT è la misura della differenza di temperatura media con l'esterno.

La *figura 8.12* mostra il test eseguito per quasi sei giorni. Sono chiari gli andamenti giorno-notte e la difficoltà del sistema di riscaldamento di fornire sufficiente stabilità durante i periodi di massima temperatura. Per questo motivo sono state scartate le fasce orarie contrassegnate in nero. Tra tutte le altre, è stato identificato un periodo sufficientemente lungo (circa 20 ore, indicato in *figura 8.12* come “*special cut*”), che va dalle ultime ore del quarto giorno alle prime ore della mattinata successiva, pertanto un periodo di acquisizione notturno. Questo significa che la variazione della temperatura esterna è stata minima e gli apporti solari irrilevanti.

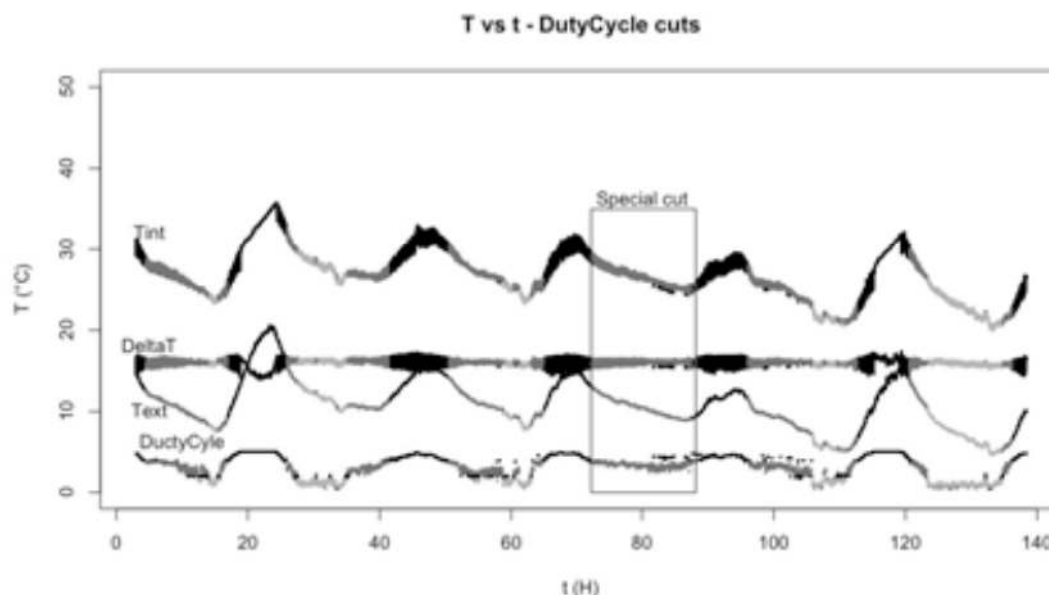


Figura 8.12. Dati relativi alla misura con ΔT costante sulla casetta: il calcolo di H_{gl} più corretto è quello ottenuto con un intervallo temporale continuo (*special cut*) evidenziato con il rettangolo nel grafico. Come si vede dall'immagine in questo periodo le variazioni esterne sono molto inferiori rispetto agli altri periodi di acquisizione.

Il valore rilevato si allontana molto da quello atteso ($H_{gl, ril} = 22.08$ W/K, $H_{gl, cal} = 18$ W/K) perché le differenze di temperatura sono state calcolate in corrispondenza degli stessi istanti di tempo, senza tenere conto del tempo di ritardo dovuto all'inerzia della struttura del modello. In questa situazione l'inerzia termica influisce in maniera rilevante perché il tempo di rilievo è molto breve, neanche di 24 ore.

Si rimanda all'Appendice C-4 per maggiori dettagli sui tutti i test svolti sul modello B per quanto riguarda questa seconda tecnica di misura testata.

Dal momento che il test non ha dato risultati sufficientemente affidabili è stata sperimentata un'altra tecnica di misura.

8.4.4. "Curva ad inseguimento" – Modello A

Il test della "curva di inseguimento" si prefigge di studiare le oscillazioni della temperatura interna dell'edificio indotte dalle variazioni della temperatura esterna riscaldando il modello di studio attraverso una sorgente di calore elettrica. Il test completo richiede una durata di qualche giorno, a partire dal raggiungimento dell'equilibrio termico. Il vantaggio di questo test è quello di portare il sistema in regime stazionario, almeno dal punto di vista dei moti convettivi interni. Infatti, non intervenendo con frequenti accensioni e spegnimenti del sistema di riscaldamento (come avviene, invece, con il test a Δt costante)

non si inducono moti convettivi discontinui.

La tecnica di misura è stata testata sul box in polistirene, in laboratorio, pertanto con una temperatura “esterna” controllata. La fonte di riscaldamento utilizzata è una lampadina elettrica da 15W.

Il test è stato fatto in quattro diverse configurazioni. La prima non prevedeva l’uso di una ventola, pertanto si è rilevata la temperatura con la stratificazione di temperatura che naturalmente si genera. Le altre tre prove sono state condotte con la ventola accesa a tre diverse velocità (50%, 70%, 90%). Tutte le misurazioni sono state fatte per un periodo di rilievo di 7 giorni.

Come indica il grafico in *figura 8.13* la curva di riscaldamento (in rosso) segue l’andamento della curva corrispondente alla temperatura esterna (blu). La curva rossa è più in alto sull’asse delle y (temperatura) della differenza di temperatura tra esterno e interno ed è *shiftata* verso destra. Tale slittamento corrisponde all’inerzia dell’involucro del box che fa “sentire” all’interno le oscillazioni esterne con un ritardo corrispondente alla capacità termica delle pareti. Nel caso del box in polistirolo lo *shift* corrisponde a circa 2 ore, mentre, come si vedrà in seguito, nel caso del modello B, che ha una capacità termica molto maggiore, tale valore aumenta. Maggiore è l’inerzia delle pareti maggiore è tale *shift*.

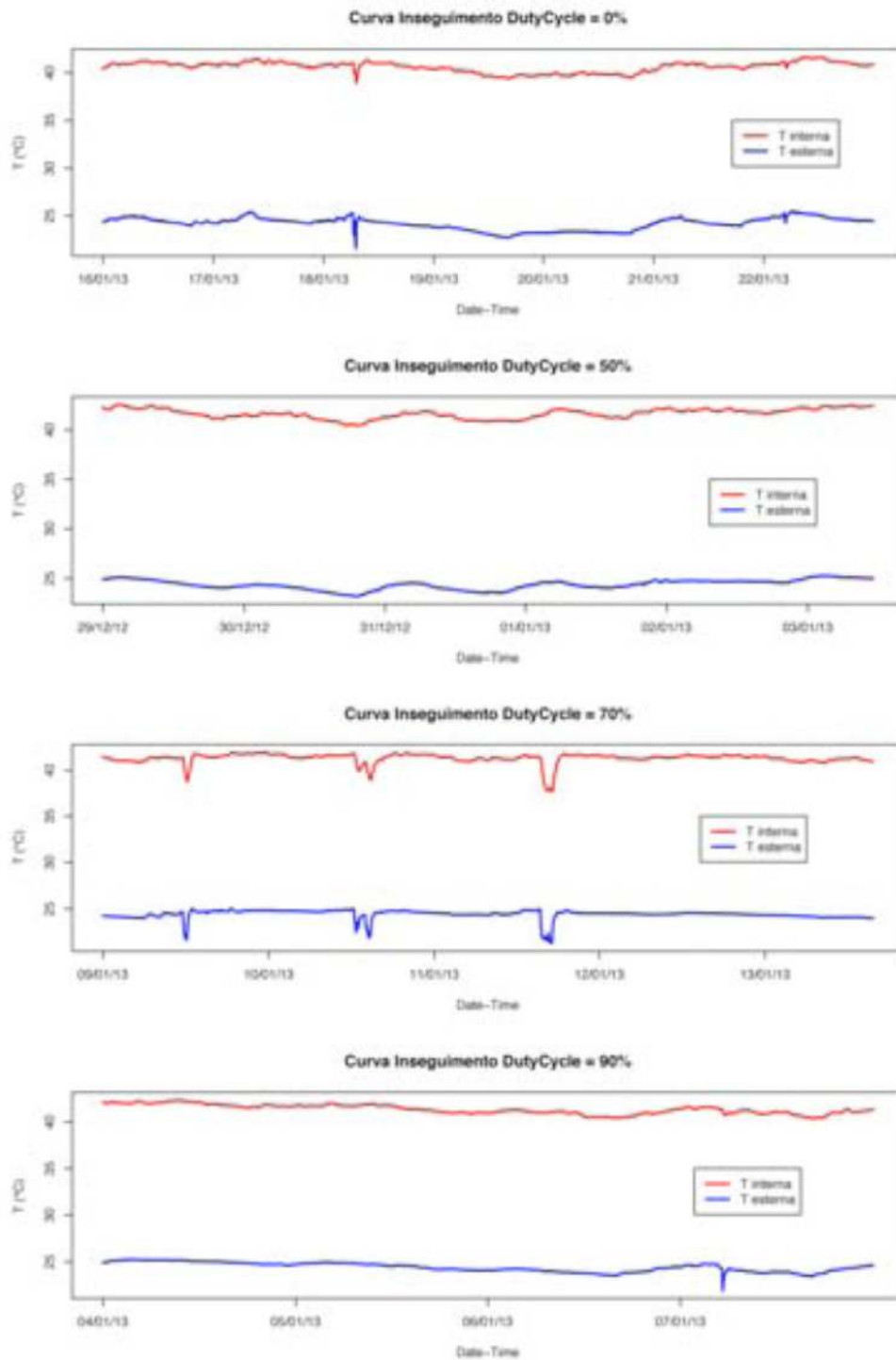


Figura 8.13. I grafici mostrano i dati di temperatura esterna (curva blu) e di temperatura interna (curva rossa) relativi ad un periodo di acquisizione di 4 giorni dei 7 complessivi, periodo corrispondente al raggiungimento dell'equilibrio termico.

In *tabella 8.2* sono riportati i valori di coefficiente globale di scambio termico rilevati. I valori di $H_{gl, ril}$ si avvicinano molto a quello teorico.

DATI OTTENUTI DAL RILIEVO CON "TEST CURVA DI INSEGUIMENTO" SUL MODELLO A	
Dati rilevati	Dato teorico
$H_{gl, ril} (0\%) = 0.912 \text{ W/K} \pm 0.016$	$H_{gl, cal} = 0,85 \text{ W/K}$
$H_{gl, ril} (50\%) = 0.868 \text{ W/K} \pm 0.007$	
$H_{gl, ril} (70\%) = 0.886 \text{ W/K} \pm 0.042$	
$H_{gl, ril} (90\%) = 0.885 \text{ W/K} \pm 0.011$	

Tabella 8.2. I dati riportati corrispondono alle diverse misurazioni fatte sul modello, in base alla differenza di velocità della ventola. Il valore dopo il +/- indica l'errore di misurazione.

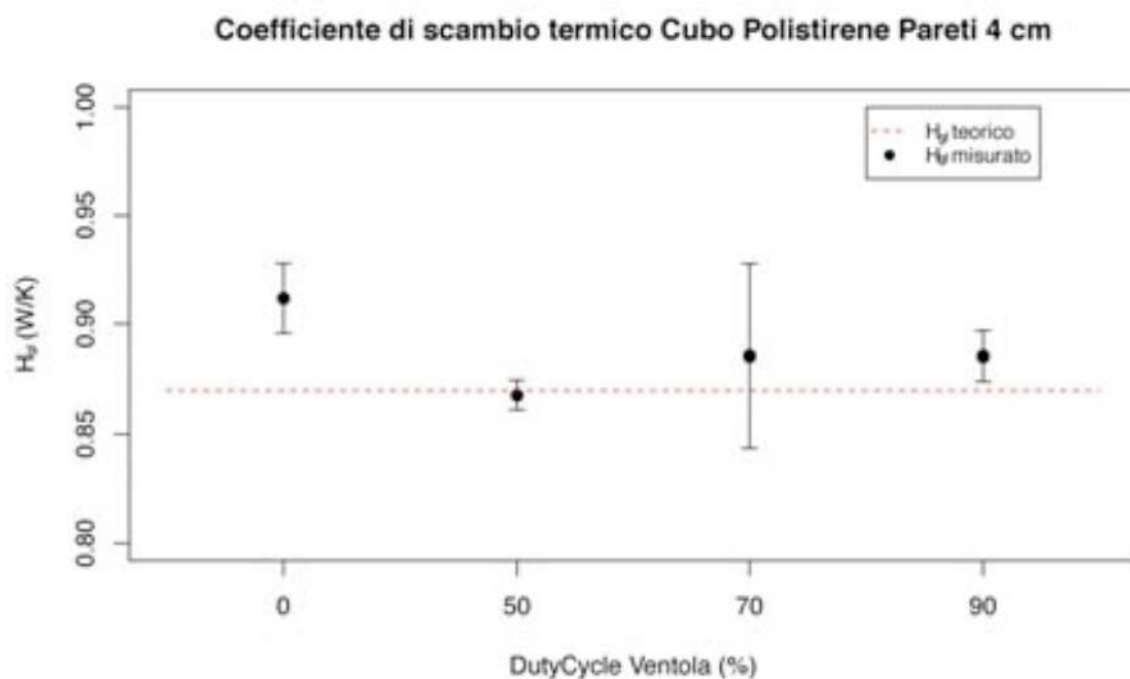


Figura 8.14. Il grafico mostra il coefficiente globale di scambio termico rilevato in base alle quattro diverse prove effettuate sul modello A.

Come si nota analizzando i risultati, il valore che si avvicina meno al dato calcolato è quello corrispondente al test fatto con la ventola spenta. Questo maggiore scarto è dovuto al fatto che il metodo analitico standardizzato con cui è stato calcolato il dato teorico di riferimento, prevede di considerare una temperatura omogenea interna. Nei test con la ventola accesa si ricrea una situazione simile a quella teorica, perché il calore prodotto dalla fonte di riscaldamento viene distribuito uniformemente all'interno dello spazio chiuso analizzato. Nel primo test a ventola spenta, invece, si risente della stratificazione di calore che si crea.

STRATIFICAZIONE DI CALORE NEL RILIEVO CON "TEST CURVA DI INSEGUIMENTO" SUL MODELLO A	
Coefficiente globale di scambio termico rilevato	Differenza di temperatura tra sonda bassa (T_{down}) e alta (T_{up})
$H_{gl, ril} (0\%) = 0.912 \text{ W/K} \pm 0.016$	Delta $T_{updown}(0\%) = 0.22 \pm 0.19$
$H_{gl, ril} (50\%) = 0.868 \text{ W/K} \pm 0.007$	Delta $T_{updown}(50\%) = 0.12 \pm 0.13$
$H_{gl, ril} (70\%) = 0.886 \text{ W/K} \pm 0.042$	Delta $T_{updown}(70\%) = 0.61 \pm 0.59$
$H_{gl, ril} (90\%) = 0.885 \text{ W/K} \pm 0.011$	Delta $T_{updown}(90\%) = 0.71 \pm 0.14$

Tabella 8.3. Si riportano i dati rilevati e le corrispondenti differenze di temperatura tra sonda posta in alto e sonda posta in basso, per la verifica della stratificazione. Anche nel modello A, dove le sonde sono a 30 cm di distanza, si rileva stratificazione di calore.

In particolare, a ventola spenta c'è un accenno di stratificazione verso l'alto ($T_{up} > T_{down}$, *tabella 8.3, figura 8.15*), considerando gli errori, l'intervallo di incertezza sfiora lo zero, però è sopra lo zero. Da considerare anche il fatto che le sonde in basso sono più vicine alla fonte di calore, quindi hanno la tendenza a misurare temperature più alte, questo avvalorava l'ipotesi che sia effettivamente presente una stratificazione verso l'alto.

Con velocità della ventola al 50% c'è sempre stratificazione verso l'alto ma in quota minore rispetto al caso 0%. Il valore di $H_{gl, ril}$ ottenuto in questo modo è più piccolo di quello ottenuto con ventola spenta.

Con velocità al 70% si vede (*figura 8.15*) che la stratificazione si è invertita, in questo caso è verso il basso ($T_{down} > T_{up}$), questo significa che la velocità della ventola inverte la stratificazione. Infatti, $H_{gl, ril}$ è aumentato rispetto al test con ventola al 50%.

Con l'ultima velocità (90%) si accentua la stratificazione verso il basso, che diventa notevole. Rispetto al 70% il valore di coefficiente globale di scambio termico non cambia molto, ma rimane sempre un po' più alto rispetto al 50%.

Sarà necessario valutare, nell'edificio reale, l'influenza sul dato globale della stratificazione di calore, che rispecchia, più della semplificazione prevista dal metodo di calcolo previsto da normativa, la situazione reale.

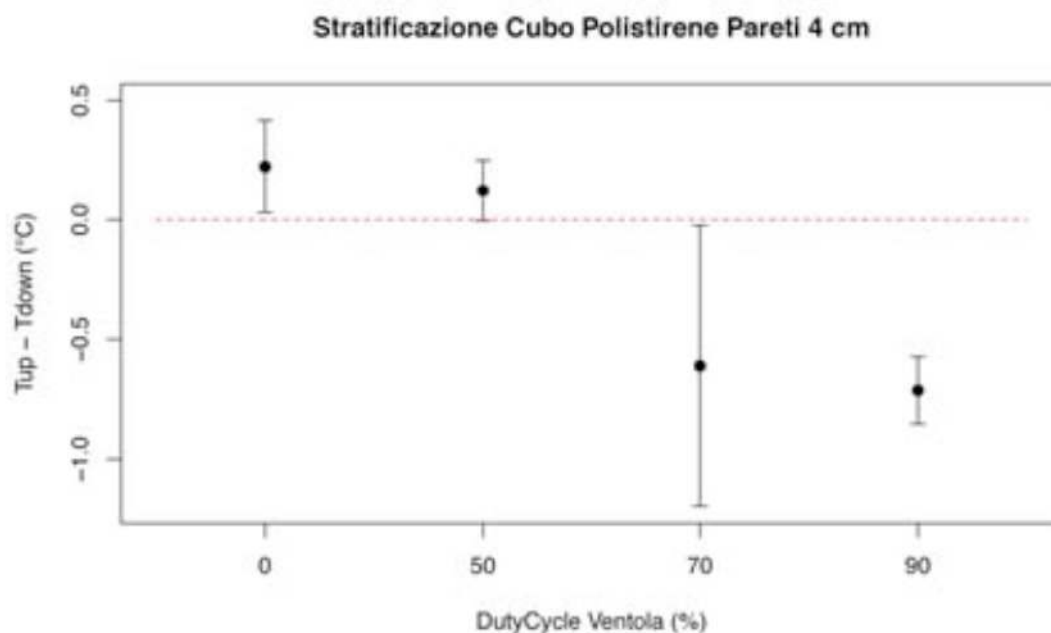


Figura 8.15. Stratificazione di calore all'interno del modello di studio A.

8.4.5. "Curva ad inseguimento" – Modello B

La terza tecnica di misura è stata testata anche sul modello in laterizio.

Il test, come nel modello in polistirene è stato eseguito sia a ventola accesa sia a ventola spenta. I periodi di rilievo sono stati i seguenti:

- 1) test con ventola accesa, dal 21/12/2012 al 14/01/2013 (periodo di 24 giorni);
- 2) test con ventola spenta, dal 14/01/2013 al 25/01/2013 (periodo di 11 giorni);
- 3) test senza ventola e con fonte di riscaldamento spenta, dal 25/01/2013 al 25/02/2013 (periodo di 1 mese).

Il sistema di riscaldamento usato, come nei test descritti precedentemente, è una lampada da 250W. Il test condotto a lampada spenta è servito per poter effettuare le correzioni. Durante il test a lampada spenta, infatti, si nota una differenza di 1 grado tra la temperatura interna e quella esterna. Questa differenza è dovuta alla presenza all'interno della cassetta della strumentazione che, nonostante emetta poco calore, in un volume molto ridotto come quello del modello, influisce, anche se di poco, sulla temperatura interna. In un edificio reale si può supporre che tale variazione non venga rilevata. Una seconda ragione può dipendere dal rilievo delle temperature esterne e dalla distanza tra le sonde e il modello. La temperatura esterna, infatti, varia a seconda del punto in cui viene rilevata. Tale variazione,

comunque, è molto limitata e influisce in maniera poco significativa sul risultato finale. In *figura 8.16* si riportano i risultati dei 3 rilievi.

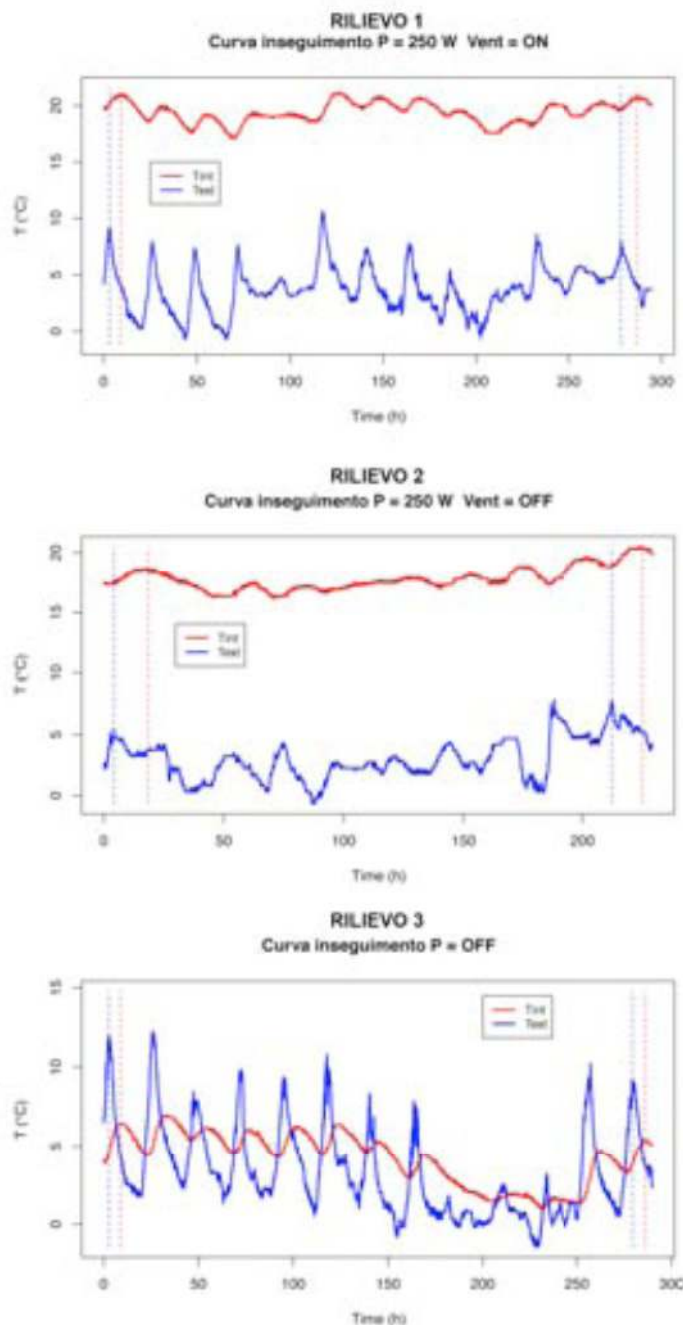


Figura 8.16.

I tre grafici rappresentano i tre rilievi effettuati. Il primo con ventola accesa, il secondo con ventola spenta e il terzo a lampada spenta (senza riscaldamento). Le linee verticali tratteggiate rappresentano gli intervalli di tempo usati per fare la media della temperatura interna (rosso) e esterna (blu). Come si vede dall'immagine gli intervalli sono shiftati per tenere conto del ritardo nella risposta della temperatura interna alla sollecitazione della temperatura esterna.

Sia nel test fatto con la ventola accesa, sia in quello con la ventola spenta, le sonde posizionate in basso rilevano temperature più alte rispetto a quelle poste più in alto. Questo è dovuto alla vicinanza delle sonde basse alla fonte di calore. Anche questo aspetto è controllabile in un ambiente reale dove è possibile posizionare la sonde ad una distanza adeguata dalla fonte di calore.

Il valore del coefficiente globale di scambio termico è stato calcolato in due modi diversi. Il primo modello di analisi segue l'equazione (3) e consiste nel ricavare H_{gl} come il rapporto tra la potenza erogata dalla sorgente di calore e la differenza delle medie delle temperature interne ed esterne. I tempi usati per fare le medie fra le temperature sono diversi perché, come si vede in figura 8.16, le temperature interne sono shiftate verso destra rispetto alle corrispondenti curve esterne.

$$H_{gl} = \frac{P}{\overline{T}_{int} - \overline{T}_{ext}} \quad [W/K] \quad (3)$$

Dove:

H_{gl} = coefficiente globale di scambio termico

$\overline{T}_{int} - \overline{T}_{ext}$ = differenza delle medie delle temperature interne ed esterne rilevate, calcolate nei rispettivi intervalli di tempo (segnati in rosso e blu nei grafici di figura 8.16).

Questo calcolo è stato condotto usando in quattro modi diversi i dati acquisiti:

- 1) Usando le temperature medie di tutte le sonde e correggendo con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $H_{t_ventON_corr} = 17.0 \pm 1.2$
 $H_{t_ventOFF_corr} = 17.9 \pm 1.3$

- 2) Usando le temperature medie di tutte le sonde e senza correggere con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $H_{t_ventON} = 15.9 \pm 1.1$
 $H_{t_ventOFF} = 16.7 \pm 1.2$

- 3) Usando le temperature medie delle sole sonde in alto e correggendo con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $H_{t_ventON_UPcorr} = 18 \pm 1.3$

$$H_{t_ventOFF_UPcorr} = 19.5 \pm 1.4$$

- 4) Usando le temperature medie delle sole sonde in alto e senza correggere con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:

$$H_{t_ventON_UP} = 16.7 \pm 1.2$$

$$H_{t_ventOFF_UP} = 17.9 \pm 1.$$

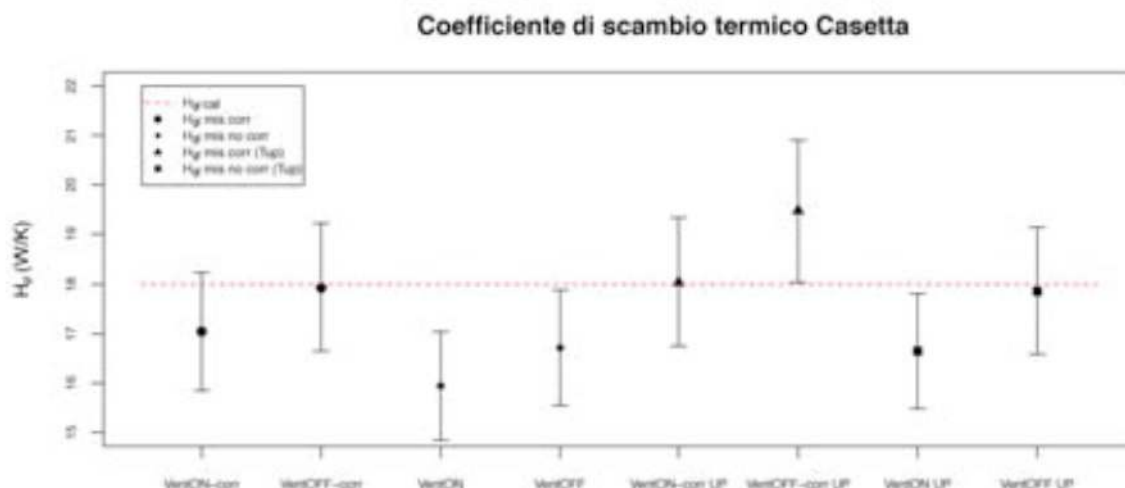


Figura 8.17. Il grafico rappresenta i dati rilevati nelle quattro diverse configurazioni calcolati con il primo metodo (media delle temperature) e il dato teorico.

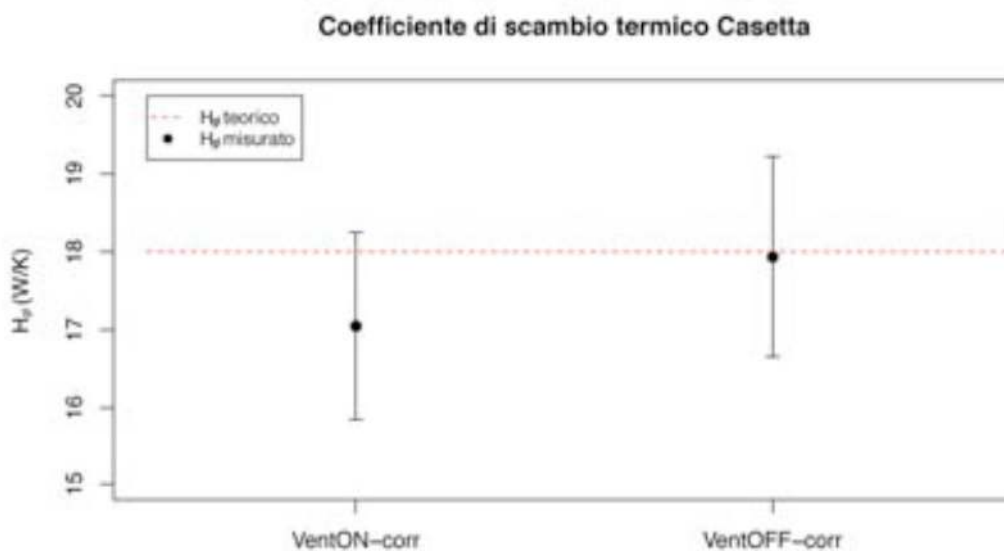


Figura 8.18. Il grafico rappresenta i dati rilevati ottenuti correggendo il valore con il rilievo a $P=0$, sia con la ventola accesa, sia spenta nel primo metodo di analisi (media delle temperature).

Il secondo modello di analisi consiste nel ricavare H_g dal rapporto tra la potenza erogata dalla sorgente di calore e la differenza delle temperature interne ed esterne punto per punto, facendo la media successivamente tra tutti i valori puntuali del coefficiente di scambio termico, secondo l'equazione:

$$\overline{H_{gl}} = \frac{P}{T_{int} - T_{ext}} \quad [W/K] \quad (4)$$

Dove:

H_{gl} = coefficiente globale di scambio termico

$T_{int} - T_{ext}$ = differenza delle temperature interne ed esterne rilevate prese punto per punto, calcolate nei rispettivi intervalli di tempo (segnati in rosso e blu nei grafici di figura 8.16).

Anche in questo caso, come mostra il grafico di figura 8.16, la differenza punto per punto delle temperature è fatta prendendo in esame i rispettivi intervalli di tempo delle temperature interne, shiftate verso destra, e esterne.

Come prima il calcolo è stato condotto usando in quattro modi diversi i dati acquisiti:

- 1) Usando le temperature medie di tutte le sonde e correggendo con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $Ht_ventON_corr = 17.0 \pm 1.2$
 $Ht_ventOFF_corr = 17.9 \pm 1.3$
- 2) Usando le temperature medie di tutte le sonde e senza correggere con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $Ht_ventON = 16.1 \pm 1.6$
 $Ht_ventOFF = 16.8 \pm 1.4$
- 3) Usando le temperature medie delle sole sonde in alto e correggendo con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:
 $Ht_ventON_UPcorr = 18.3 \pm 2.1$
 $Ht_ventOFF_UPcorr = 18 \pm 1.6$

- 4) Usando le temperature medie delle sole sonde in alto e senza correggere con la curva ottenuta con $P=0$ (riscaldamento spento) i risultati sono:

$$Ht_{ventON_UP} = 16.9 \pm 1.7$$

$$Ht_{ventOFF_UP} = 19.6 \pm 1.9$$

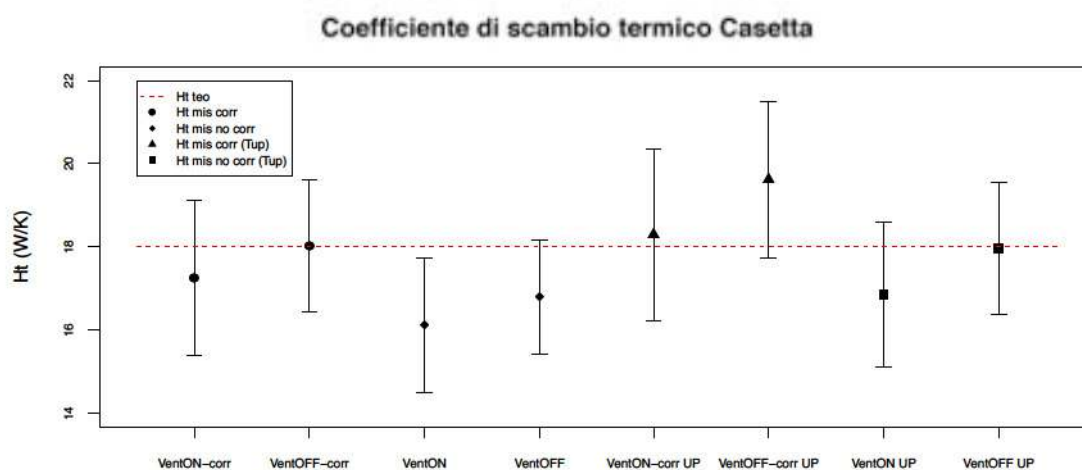


Figura 8.19. Il grafico rappresenta i dati rilevati nelle quattro diverse configurazioni calcolati con il secondo metodo (temperatura punto per punto) e il dato teorico.

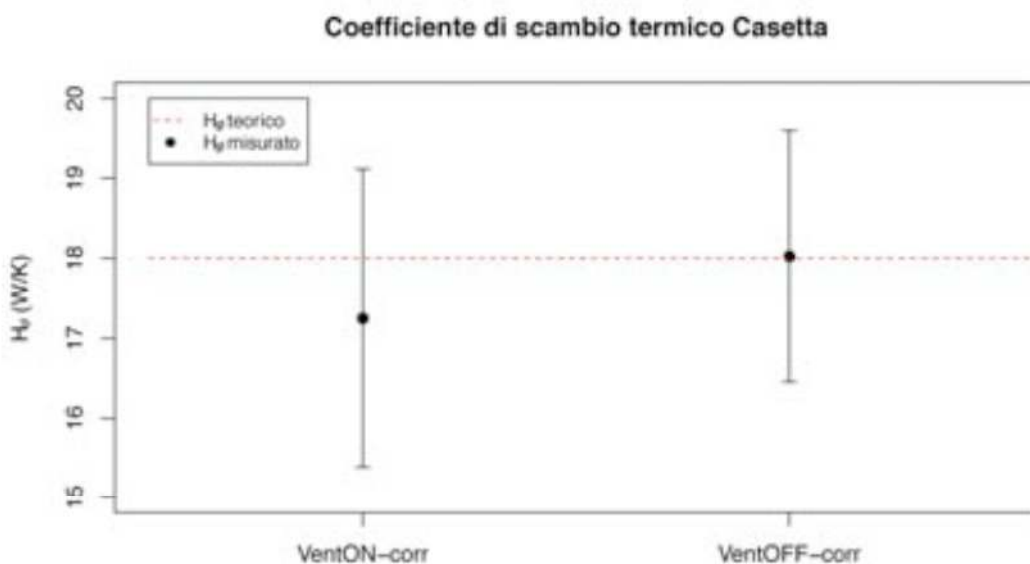


Figura 8.20. Il grafico rappresenta i dati rilevati ottenuti correggendo il valore con il rilievo a $P=0$, sia con la ventola accesa, sia spenta, nel secondo metodo di analisi (temperatura punto per punto).

Nonostante i diversi calcoli, tutti i valori ottenuti sono confrontabili fra loro e con il valore teorico ($H_{gl, cal} = 18W/K$). Questo significa che la tecnica di misura indagata rappresenta in maniera affidabile il comportamento energetico del modello. Si ritiene che questo sistema di misura possa essere esportato al caso reale, che permetterà di perfezionare sia la valutazione degli errori (si rimanda all'Appendice C-5), sia le piccole imperfezioni di rilevamento dovute alla vicinanza delle sonde alla fonte di calore e all'influenza, seppur già ridotta nel caso del modello, della presenza della strumentazione all'interno dell'ambiente rilevato.

Il sistema sperimentato permette di ottenere un valore di coefficiente globale di scambio termico reale che tiene presente sia la conformazione e la composizione materica del fabbricato, sia l'inerzia termica dovuta alla massa muraria che contraddistingue gli edifici antichi. Inoltre, si ipotizza che il rilievo, anche di un edificio reale, preveda una durata di acquisizione dati piuttosto ridotta (circa 2 settimane) e una potenza di riscaldamento moderata che non surriscaldi eccessivamente il fabbricato. Questo aspetto è importante per la tutela degli apparati decorativi presenti negli ambienti di maggior pregio. La necessità di acquisire i dati per un periodo di tempo di circa 2 settimane dipende dal calcolo delle medie delle temperature esterne e interne. In un periodo molto breve (due giorni, per esempio) le variazioni di temperatura dovute alle oscillazioni giorno/notte e alle differenze di temperatura tra un giorno e l'altro possono influire molto sul risultato. Al contrario, a mano a mano che aumenta la durata dell'acquisizione il tempo di shift incide sempre meno sul risultato (Figura 8.21).

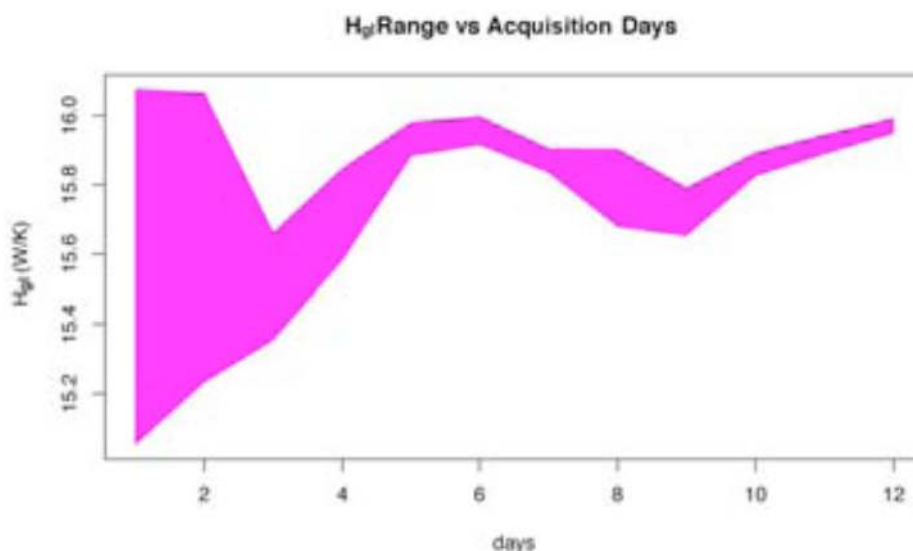


Figura 8.21. Il grafico mostra a grande scala il restringimento del *range* di valori corrispondenti al coefficiente globale di scambio termico all'aumentare dei giorni di acquisizione. Dopo 12 giorni tale *range* è già molto piccolo.

8.5. Conclusioni della sperimentazione

Gli ultimi test sui modelli in scala, relativi alla tecnica di misura “curva di inseguimento” hanno dato dei risultati soddisfacenti, perché descrivono correttamente la prestazione energetica dell’oggetto analizzato. Il coefficiente globale di scambio termico rilevato è confrontabile con quello calcolato analiticamente, sia nel modello A sia in quello B.

Pertanto è stata individuata la tecnica di misura corretta, che può dare un valore reale di scambio termico anche nelle situazioni in cui non è possibile avere un valore di riferimento teorico attendibile. La sperimentazione continuerà esportando tale sistema di misura ad un caso studio reale.

Testare il sistema sul caso reale permetterà di stabilire gli effettivi tempi di rilievo e la strumentazione necessaria per la creazione del kit di rilievo completo: per esempio, il numero di sonde necessarie per mappare l’intero volume riscaldato significativo e il sistema di riscaldamento più idoneo, per ottenere il risultato ricercato nei tempi più brevi possibili.

Si auspica, infine, che il confronto tra il valore calcolato analiticamente (metodo di calcolo UNI TS 11300), quello rilevato sperimentalmente tramite il sistema messo a punto e quello ottenibile attraverso gli strumenti di calcolo semplificati, possa fornire alcuni risultati di validità generale, utili a descrivere il comportamento energetico dell’architettura storica. Il sistema di rilievo non rappresenta solo uno strumento alternativo al calcolo analitico, per la valutazione e la progettazione degli interventi di riqualificazione, ma anche uno strumento per continuare la ricerca intrapresa, nell’ambito della valutazione del comportamento energetico dell’architettura antica.

Parte IV
Conclusioni

CAPITOLO 9

Considerazioni conclusive e sviluppi futuri

9.1. Risultati dello studio dello stato dell'arte

La tesi di dottorato si è inserita nel tema della riqualificazione energetica dell'edilizia storica perché ad oggi manca uno studio specifico dedicato alla valutazione delle prestazioni energetiche residue dei fabbricati antichi. Nel processo progettuale che porta alla riqualificazione energetica di un fabbricato, si ritiene che la fase conoscitiva sia la più delicata, soprattutto nel caso di edifici che portino con sé valori testimoniali ed artistici da preservare.

Per questa ragione, **il primo obiettivo della tesi** è stato dimostrare che allo stato attuale dell'arte manchi un approccio specifico al problema, in particolare per quanto riguarda l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici storici allo stato di fatto. In seguito si è dato risalto a quanto il mondo scientifico e professionale abbia riconosciuto, e continui a farlo, l'importanza di approfondire il tema della riqualificazione energetica dell'architettura storica e contestualmente riconosca la necessità di adeguare alle esigenze di *comfort* attuali anche questa tipologia di edifici. Parallelamente a questa convinzione, però, non si è sviluppato un sistema strutturato di ricerche, che orientino operativamente sul campo i principi teorici. I primi risultati delle ricerche presentate fino ad ora hanno riguardato prevalentemente l'elaborazione di buone pratiche per definire *linee guida di intervento*, per quanto riguarda la scelta dei materiali e dei sistemi impiantistici compatibili con la fabbrica storica.

Pochi enti di ricerca si stanno, invece, occupando di studiare la fase istruttoria di questo processo progettuale, la valutazione, cioè, delle prestazioni energetiche dell'edificio allo stato di fatto e altrettanto pochi sono gli studi che se ne sono occupati. Queste prime ricerche sull'argomento dimostrano che il risultato delle simulazioni energetiche rappresenta il dato di partenza per la progettazione degli interventi. Se tale valore è scorretto, nel senso che sovrastima o sottostima le prestazioni energetiche dell'edificio prima dell'intervento, questo errore influisce negativamente anche sulle soluzioni previste dall'intervento stesso. Un progetto sbagliato può, nel caso dell'edilizia storica, pregiudicare la tutela e la salvaguardia futura dei valori intrinseci dell'edificio. Per questa ragione, è necessario porre la massima attenzione a questa prima fase del processo progettuale.

9.2. I metodi di calcolo semplificati

Gli strumenti che il progettista ha oggi a disposizione, per il calcolo delle prestazioni energetiche allo stato di fatto, sono di due tipi, entrambi elaborati per la valutazione di edifici di nuova o recente costruzione e non specificatamente per l'edilizia storica.

Il primo è rappresentato dal corpo metodologico normativo, che indica il calcolo corretto per la simulazione energetica dei fabbricati (calcolo analitico standardizzato), mentre il secondo è costituito dai metodi di calcolo semplificati, basati sulla semplificazione di alcuni passaggi del metodo standardizzato, utili a rendere più rapido e facile il calcolo delle prestazioni energetiche nella pratica professionale quotidiana.

La ricerca si è basata, dapprima, sullo studio attento del corpo metodologico di calcolo e degli altri strumenti di calcolo e, successivamente, sull'applicazione di tali metodi agli edifici storici scelti come casi studio. Le simulazioni energetiche effettuate hanno permesso di dimostrare che esiste uno scostamento significativo tra il risultato di prestazione energetica ottenuto con il metodo analitico standardizzato e i metodi semplificati. In particolare è stato fatto un confronto tra il metodo di calcolo analitico standardizzato, preso come valore di riferimento, e due metodi semplificati, il metodo *Docet* (il più diffuso tra gli strumenti commerciali non a pagamento) e le indicazioni per la semplificazione suggerite dalla normativa stessa (UNI TS 11300).

Il primo risultato di questa prima fase è, pertanto, che i metodi di calcolo semplificati *sovrastimano* l'Indice di Prestazione Energetica per l'involucro.

In particolare, il metodo di calcolo semplificato *Docet* sovrastima l'indice di prestazione energetica per l'involucro in media del 40%; mentre il metodo di calcolo semplificato UNI TS 11300 sovrastima l'indice di prestazione energetica per l'involucro in media del 20%;

Le cause di questi scostamenti, in entrambi i casi molto significativi, sono da imputare alla caratterizzazione termica dell'involucro, fatta in base alle semplificazioni previste dai metodi utilizzati. Queste semplificazioni permettono al progettista di selezionare, in abachi forniti dalla normativa, alcuni valori pre-calcolati, elaborati a partire da prove sperimentali sul campo fatte su edifici non storici. La non specificità di questi strumenti fa sì che gli *scambi termici verso l'esterno* siano sovrastimati e gli *scambi termici verso ambienti non climatizzati* siano sottostimati.

Questo risultato mette in evidenza quanto lo scarto tra i valori ottenuti con i metodi semplificati rispetto a quelli ottenuti con metodo analitico standardizzato sia molto elevato; allo stato attuale si ritiene che il risultato dei calcoli semplificati non possa essere utilizzato come dato su cui impostare la progettazione di opportune operazioni di miglioramento energetico. Infatti, ottenere un indice di prestazione energetica dell'edificio molto maggiore di quello reale induce il progettista a proporre soluzioni tecnologiche molto superiori a quelle realmente necessarie. In particolare, visto che le scelte più diffuse riguardano

l'isolamento termico dell'involucro. La previsione di uno strato di isolamento molto elevato migliora la prestazione energetica dell'edificio in regime invernale, ma rischia di pregiudicare la buona prestazione estiva, data da inerzia termica e periodi lunghi di sfasamento, tipica degli involucri antichi.

Inoltre, intervenire pesantemente sulla stratigrafia dell'involucro rischia di alterarne il comportamento termo-igrometrico originale. In molti casi, riqualificando un fabbricato antico è obbligatorio pensare il nuovo strato isolante sul lato interno. Tale scelta, se non calibrata sulle reali prestazioni dell'elemento tecnologico, lo espone a fenomeni di congelamento, per esempio, dovuti al raffreddamento degli strati più esterni della chiusura. Questo implica maggiori probabilità di rottura di eventuali canalizzazioni presenti nei lati più esterni delle murature o il degrado più rapido dei materiali superficiali quali malte, intonaci o laterizi gelivi.

Il risultato dell'analisi della ricerca mette in evidenza un altro aspetto importante. Si è dimostrato che le valutazioni preliminari fatte con gli strumenti di calcolo semplificati sottostimano gli scambi termici attraverso gli ambienti confinanti non riscaldati. Questa errata valutazione spinge a non considerare, nel progetto, la possibilità di migliorare la prestazione di questi elementi, compromettendo il miglioramento dato dall'intervento sull'involucro esterno.

Per queste ragioni sono state formulate delle proposte di affinamento dei metodi di calcolo che, quando applicate, permetteranno di ridurre lo scarto tra i risultati e ottenere un valore molto più vicino alla realtà. **Le proposte di modificazione della normativa costituiscono il primo risultato applicativo della tesi**, perché forniscono indicazioni operative per l'adattamento degli attuali sistemi di calcolo energetico al caso specifico dell'edilizia storica.

9.2.1. *Proposte per l'affinamento del metodo semplificato Docet*

Per il metodo di calcolo semplificato *Docet*, si sono proposti due tipi di modificazioni.

Le prime riguardano l'inserimento dei dati utili a caratterizzare termicamente l'edificio e i componenti tecnologici che costituiscono l'involucro, utilizzando il sistema di calcolo e il *software* di interfaccia esistenti. Si riportano di seguito le principali indicazioni suggerite.

- a) Per quanto riguarda la caratterizzazione geometrica dell'edificio (superficie netta e lorda, volume riscaldato, altezza interpiano, estensione superficiale dell'edificio in pianta) si prescrive di inserire nel *software* di calcolo i valori calcolati analiticamente e non rifarsi al sistema automatico di calcolo previsto dal programma.
- b) In merito all'inserimento dei valori di trasmittanza termica delle strutture si suggerisce di non utilizzare i valori presenti nel menù a tendina, relativi a componenti tecnologici non storici, ma di usare:

-
1. per le chiusure verticali, il *valore di trasmittanza ponderato* su tutte le tipologie presenti nell'edificio, calcolato analiticamente (secondo la UNI EN ISO 6946);
 2. per le chiusure orizzontali inferiori, il valore di trasmittanza calcolato analiticamente in caso di una sola tipologia e il *valore di trasmittanza ponderato* nel caso in cui nell'edificio ci siano diverse tipologie di solaio a terra.

Applicando tali proposte di modifica, si ottengono dei miglioramenti sensibili nel risultato finale. In particolare:

- forzando il valore della trasmittanza termica delle chiusure verticali, lo scostamento fra i risultati passa dal 40 al 20%;
- forzando il valore della trasmittanza termica delle chiusure orizzontali inferiori, lo scostamento fra i risultati passa dal 40 al 14%;
- forzando entrambi i valori lo scostamento fra i risultati passa dal 40 al 10%.

Il secondo tipo di modifica proposta prevede di intervenire sul sistema di calcolo, suggerendo le trasformazioni necessarie alla creazione di un metodo *DocetHB (Docet Historical Buildings)* specifico per l'edilizia storica e unisce le prime indicazioni alle seconde.

Si è suggerito di implementare le opzioni selezionabili dal menù a tendina nel sistema di inserimento del *software*, per la descrizione delle chiusure verticali e per la caratterizzazione degli ambienti non climatizzati confinanti con la zona termica indagata. La creazione di nuovi menù a tendina deve essere fatta a partire da rilievi energetici sul campo di strutture edilizie storiche, per poter creare un nuovo abaco specifico dal quale il progettista possa rapidamente selezionare un valore di trasmittanza termica corretto, senza doverlo calcolare analiticamente. Questa seconda modificazione richiede di collaborare direttamente con gli sviluppatori del *software Docet*.

9.2.2. Proposte per l'affinamento del metodo semplificato UNI TS 11300

La normativa che raccoglie il corpo metodologico di calcolo della prestazione energetica degli edifici fornisce indicazioni per la semplificazione di alcuni passaggi del calcolo, in particolare per gli edifici esistenti dove non è sempre possibile conoscere la precisa stratigrafia tecnologica dell'edificio in esame. Tali semplificazioni sono permesse consentendo al progettista di selezionare i componenti tecnologici da abachi normativi che includono le principali stratigrafie diffuse nelle costruzioni esistenti di recente costruzione. Di queste sono state calcolate, e vengono indicate nelle tabelle, le caratteristiche termiche delle strutture, sulla base di rilievi sul campo. La consultazione di questi abachi permette di ricavare i dati

dalle tabelle senza doverli calcolare analiticamente. Il limite di queste semplificazioni, dimostrato con questo lavoro, dipende dal fatto che, in molte situazioni, le soluzioni descritte negli abachi tecnologici non corrispondono alle strutture storiche, che presentano caratteristiche termiche molto differenti. Per questo la tesi propone di creare nuovi abachi tecnologici storici da affiancare a quelli esistenti. Per poter contare su dati pre-calcolati delle prestazioni energetiche residue degli elementi tecnologici storici, realmente riferiti a strutture edilizie antiche, si propone una campagna di rilievi sul campo, a partire dalle schede tecnologiche messe a punto. I rilievi dovranno interessare un numero consistente di casi studio in modo che possa essere definito un valore di prestazione energetica valido per un numero elevato di situazioni.

I criteri per la selezione dei casi studio dovranno riguardare:

- epoca di costruzione dell'edificio;
- materiali di involucro impiegati;
- livello di degrado delle strutture (in riferimento al livello di disomogeneità delle componenti tecnologiche);
- presenza e tipologia di ponti termici;
- stato di umidità dei componenti tecnologici di involucro.

I componenti tecnologici da indagare sono:

- CHIUSURE VERTICALI: muratura in mattoni faccia a vista (con e senza intonaco), muratura a sacco (con e senza intonaco), muratura in pietrame (con e senza intonaco), muratura in tufo (con e senza intonaco), muratura in argilla, pareti in legno;
- CHIUSURE SUPERIORI: coperture lignee, coperture a volta;
- CHIUSURE INFERIORI: solaio a terra tradizionale (allettamento con sabbia o simili), solaio in voltine in laterizio.

Gli ambienti non climatizzati attraverso cui avviene scambio termico da indagare sono:

- PIANI INTERRATI (*buffer inferior*): cantine, passaggi sotterranei, cunicoli;
- SOTTOTETTI: differenti tipologie in base al tipo di controsoffitto e di copertura;
- ANDRONI;
- VANI SCALE;
- PORTICI.

La creazione di abachi tecnologici specifici per l'edilizia storica permetterà di ottenere dei dati di indice di prestazione energetica allo stato di fatto molto più corretti di quanto avvenga con gli attuali strumenti a disposizione.

9.3. Il metodo di calcolo analitico standardizzato

Come si è detto in precedenza, nella prima parte del lavoro, il confronto tra i metodi di calcolo è stato impostato usando come riferimento il metodo analitico standardizzato. Esso, infatti, costituisce ad oggi lo strumento più completo e preciso per la determinazione della prestazione energetica di un edificio allo stato di fatto.

L'applicazione di questo metodo di calcolo ai casi studio selezionati per l'analisi (edifici rappresentativi della categoria edilizia in esame), ne ha, però, messo in evidenza alcuni limiti.

La ricerca ha dimostrato che tali limiti applicativi del metodo analitico standardizzato sono da imputare, in particolare, a due aspetti.

In primo luogo, la normativa prescrive di condurre il calcolo in regime mediamente stazionario lasciando alla discrezionalità del progettista la possibilità di fare un calcolo in regime dinamico. Il calcolo condotto in regime mediamente stazionario, però, non tiene conto di alcuni fattori tipici dell'edificio storico che possono influenzare positivamente il calcolo.

Questi aspetti sono legati in particolare alla capacità termica dell'involucro, alla ventilazione naturale e ai flussi convettivi e radianti.

Il risultato delle simulazioni energetiche condotte sui casi studio ha evidenziato uno scostamento tra i valori di prestazione energetica ottenuti con il metodo analitico standardizzato fatto in regime mediamente stazionario rispetto a quelli ottenuti con lo stesso calcolo condotto in regime dinamico; questi ultimi risultano del 50% inferiori ai primi. Il risultato evidenzia, pertanto, che tenere presenti i fenomeni transitori, determinati dalla capacità termica dell'involucro, dal computo corretto della ventilazione naturale e dai moti convettivi e radianti, consente di ottenere un risultato notevolmente più corretto che si traduce in un intervento di riqualificazione energetica assai più rispettoso del fabbricato. Computare i fenomeni transitori consente di descrivere l'edificio nella totalità delle sue caratteristiche termiche ed esse influiscono positivamente sulla prestazione energetica globale del fabbricato.

Come primo risultato di questa seconda parte si è proposto, pertanto, di rendere *obbligatorio da normativa* il calcolo analitico standardizzato condotto *in regime dinamico*, per gli edifici che presentino una capacità termica dell'involucro notevole (superiore a 230 kg/m²), dalla quale dipendono i fenomeni transitori causa dello scostamento dei risultati.

Allo stato attuale, la normativa non richiede, quale obbligatorio, il calcolo in regime dinamico, pertanto, ad oggi, il calcolo standardizzato condotto in regime mediamente stazionario rappresenta il metodo più utilizzato (quando non si ricorra ai metodi semplificati visti in precedenza), in quanto più semplice di quello dinamico. Per questa ragione, la ricerca si è soffermata anche sulla valutazione del metodo di calcolo standardizzato fatto in regime mediamente stazionario applicato all'edilizia storica, per verificarne i limiti di applicazione. Infatti, per quanto riguarda la parte relativa alla caratterizzazione termica dell'involucro (scambi termici verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati), il metodo standardizzato prevede la stessa procedura sia in regime mediamente stazionario, sia in regime dinamico. Per entrambi i sistemi di calcolo l'obiettivo è stato individuare quali siano i dati, richiesti dal metodo di calcolo, più difficili da definire con precisione nel caso dell'edilizia storica, per proporre soluzioni alternative per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici storici con metodo standardizzato. L'applicazione del metodo ai casi studio selezionati per l'analisi ha evidenziato che i principali limiti nell'applicazione del metodo di calcolo standardizzato all'edilizia storica riguardano:

A) la precisa caratterizzazione termica dell'involucro tramite:

1. il calcolo della trasmittanza termica;
2. il calcolo della resistenza superficiale interna;
3. il flusso termico attraverso la parete;
4. la conoscenza esatta della stratigrafia dell'involucro;

B) la corretta definizione dei ponti termici;

C) la descrizione esatta degli scambi termici (verso il terreno e verso gli ambienti non climatizzati).

Il metodo prescritto dalla normativa per la definizione dell'indice di prestazione energetica allo stato di fatto descrive tutti i passaggi necessari per ottenere un calcolo corretto. Il limite non riguarda il metodo in sé, ma la reale possibilità da parte del progettista di applicarlo correttamente all'edificio storico. Soltanto conoscendo tutti i dati che esso richiede, infatti, il risultato potrà corrispondere alla realtà; nel caso in cui, come spesso accade per l'edilizia storica, i dati non siano noti con sufficiente precisione, lo scarto potrà essere anche molto elevato. Per questa ragione la ricerca ha proposto di affiancare al metodo analitico un metodo di rilievo strumentale diretto, attraverso il quale ottenere un indice di prestazione energetica rilevato *in situ* a prescindere dalla conoscenza della reale composizione dell'involucro architettonico.

Il secondo risultato operativo del lavoro è relativo alla ideazione e messa a punto di questo strumento di rilievo. L'idea di sviluppare un tale metodo di indagine è stata maturata durante il periodo di *visiting scholar* presso la *University of Nottingham (Department of the Built Environment)*, durante il quale è stato possibile apprendere le tecniche di misura sul campo sperimentate in Gran Bretagna. L'esperienza

inglese è stata, successivamente, adattata al caso dell'edilizia storica e utilizzata come base per l'elaborazione di un nuovo metodo adatto a perseguire i risultati specifici di questa ricerca.

La sperimentazione è stata condotta su due modelli di studio attraverso i quali è stato possibile testare alcune tecniche di misura per l'elaborazione dei dati rilevati. Il rilievo consiste nel misurare la temperatura interna ed esterna in un ambiente riscaldato elettricamente. La quantità di calore necessaria a mantenere una certa temperatura (o differenza di temperatura) definisce il coefficiente globale di scambio termico di quell'ambiente, dato utile all'ottenimento dell'indice di prestazione energetica. La messa a punto di un *kit* di rilievo delle prestazioni energetiche di un edificio storico permette di affiancare agli strumenti di calcolo attuali, modificati con le proposte di affinamento suggerite, uno strumento operativo che non preveda la conoscenza esatta di tutti gli elementi che compongono l'involucro edilizio, per ottenere la prestazione energetica globale del fabbricato, comprensiva dei ponti termici e delle disomogeneità materiche tipiche dell'edificio storico.

I risultati preliminari della sperimentazione sui modelli di studio hanno permesso di stabilire la tecnica di misura più corretta, esportabile al caso reale. Questa tecnica, definita "curva di inseguimento" descrive le oscillazioni della temperatura interna all'edificio indotte dalle variazioni della temperatura esterna. Il sistema così descritto, tiene conto, a differenza delle altre tecniche di misura sperimentate, anche della capacità termica dell'involucro che viene determinata principalmente dalla grande inerzia delle strutture. L'effetto di questa caratteristica, tipica dell'architettura storica, non viene stimato né con il metodo di rilievo elaborato in Gran Bretagna per edifici non storici, perché essi non presentano grande inerzia, né con il metodo di calcolo analitico standardizzato condotto in regime stazionario.

La sperimentazione ha raggiunto alcuni primi interessanti risultati, che permetteranno di definire tutte le operazioni per l'utilizzo dello strumento da parte di operatori non qualificati. Si sta mettendo a punto un sistema di elaborazione dei dati *user-friendly*, in modo che chiunque possa usare tale strumento, con facilità e soprattutto in tempi rapidi. La sperimentazione per la messa a punto di questo *kit* è ancora in corso. Dovrà necessariamente proseguire oltre il tempo naturale previsto per il dottorato perché è assai complessa e coinvolge discipline e enti di ricerca diversi. Il **proseguimento della ricerca** riguarderà l'estensione dei risultati ottenuti sui modelli in scala al caso reale.

Questa parte del lavoro, volta allo studio di un metodo di rilievo energetico diretto, rappresenta il tentativo di accrescere, attraverso la ricerca sperimentale, le conoscenze sull'ambiente costruito perché si ha la convinzione che esso, in quanto patrimonio ricco di valori testimoniali, debba essere compreso a fondo prima di applicare a priori soluzioni tecnologiche definite in precedenza per scopi o prodotti edilizi differenti. La sperimentazione rappresenta un'opportunità di sviluppo delle conoscenze sul comportamento energetico dei fabbricati storici, orientate alla produzione di sistemi tecnologici, materiali e

metodi di calcolo, sviluppati specificatamente per l'intervento su edifici di pregio storico.

I risultati ottenuti permettono di indirizzare il lavoro verso nuovi interessanti scenari di studio, che potranno completare e integrare quelli raggiunti fino ad ora. Il percorso di indagine delle prestazioni energetiche residue di un edificio storico sta muovendo in questi anni i primi passi e la ricerca di dottorato si inserisce in un contesto scientifico in gran parte ancora da esplorare. Per questo motivo, i risultati raggiunti con questo lavoro sono preliminari. Molti degli aspetti indagati sono interdisciplinari, perché prevedono l'integrazione di discipline specifiche diverse (tecnologia dell'architettura, restauro, fisica tecnica). Per tale ragione, si spera di poter portare avanti la ricerca continuando le proficue collaborazioni intraprese finora con il *Department of the Built Environment* della *University of Nottingham* e con il Dipartimento di Fisica dell'Università degli studi di Ferrara e di stringere nuove collaborazioni scientifiche con altri istituti di ricerca italiani e internazionali.

Marta Calzolari, *Valutazione del comportamento energetico dell'architettura storica.*
Analisi dei metodi di calcolo dello stato di fatto energetico e proposte correttive.

Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura ICAR/12, XXV ciclo, Università degli Studi di Ferrara, 2010-2012

Bibliografia ragionata

Architettura e storia

Volumi e contributi in volume

- * Ackerman J., *Palladio*, Piccola Biblioteca Einaudi, Torino, 2000;
- * Adam J., *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e Tecniche*. Biblioteca di Archeologia, Longanesi, Milano, 2008;
- * Alberti A., *Il progetto di restauro: il "riuso" dell'ex monastero di S. Antonio in Polesine come sede di conservazione e studio dei materiali archeologici di epoca medievale e postmedievale provenienti da scavi cittadini*, in Guarnieri C., a cura di, *S. Antonio in Polesine, archeologia e storia di un monastero estense*, All'Insegna del Giglio, Firenze, 2006, pp. 69-74;
- * Arosio F., Cecchini P., a cura di, *Italia patrimonio culturale dell'umanità*, Roma, 2003;
- * Caniggia G., Maffei G.L., *Lettura dell'edilizia di base*, Saggi Marsilio, Venezia, 1979;
- * Ferri S., Maggi S., a cura di, *Vitruvio Architettura*, BUR Rizzoli, Classici Greci e Latini, Milano, 2010;
- * Frizzi A., *Memorie per la storia di Ferrara*, Abram Servadio Editore, Bologna, 1850;
- * Guarnieri C., a cura di, *S. Antonio in Polesine, archeologia e storia di un monastero estense*, All'Insegna del Giglio, Firenze, 2006;
- * Guarnieri C., Librenti M., *Sviluppo di un insediamento monastico nella Ferrara tardo medievale: il convento di Sant'Antonio in Polesine*, in "Società degli archeologi medievisti italiani", primo congresso nazionale di archeologia medievale, Pisa, 1997;
- * Palladio A., *I Quattro libri dell'Architettura*, Apresso Bartolomeo Carampello, Venezia, 1571;
- * Pisa C., *Note storiche sul Palazzo Cicognara-Sani*, Ferrara, 2004;
- * Sinopoli N., *La tecnologia invisibile. Il processo di produzione dell'architettura e le sue regie*, Milano, Franco Angeli, Milano, 1997;
- * Varese R., *La chiesa e il convento di S. Antonio in Polesine*, in *Donazioni e Restauri 2*, Firenze, 1985.

Studi e ricerche

- * Cavicchi C., *Relazione tecnica del progetto di restauro di Palazzo Nigrelli-Rivani via Palestro 64*, Ferrara, 2011;
- * Cavicchi C., *Relazione finale degli interventi di restauro eseguiti nella casa sita in Ferrara, via Palestro 52*, Ferrara, 2007;
- * Università IUAV di Venezia, *Studio di fattibilità tecnico-scientifica per l'individuazione di un programma di interventi di restauro conservativo e funzionale per la città di Apice*, 2004.

Energia e storia

Volumi e contributi in volume

- * Ambrogio K., Dalla Negra R., Zuppiroli M., *Miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia storica: tra istanze conservative e prestazionali*, in P. Davoli, a cura di, *Il Recupero energetico e ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp. 29-38;
- * Belpoliti V., Calzolari M., Reitano R., *La Riqualificazione del costruito - Un processo di riqualificazione storico ambientale del tessuto storico: la proposta di "Borgo-Clima" in Forlani M.C.*, a cura di, "Cultura tecnologica e progetto sostenibile", Atti del workshop progettuale "Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano", organizzato da SITda, Pescara Caporciano 31 Maggio – 5 Giugno 2010, Alinea Editrice, Pescara, 2010, pp. 308-325;
- * Belpoliti V., *Il museo nel museo. L'edificio nella teca di vetro*, in P. Davoli, a cura di, *Il recupero energetico ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp. 83-90;
- * Caivano E., Fatiguso F., *Energetic sustainability of Historical town centres*, atti del convegno "SB10mad", 2010;
- * Calzolari M., *Dalla chiusura del passato all'apertura del moderno. Recupero energetico del convento di S. Antonio in Polesine per un nuovo polo culturale a Ferrara*, in P. Davoli, a cura di, "Il Recupero energetico e ambientale del costruito", Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp.110-117;
- * Calzolari M., *Risparmiare il passato. Il progetto per il quartiere Barca a Bologna come esempio di riqualificazione energetica dell'edilizia residenziale pubblica*, in P. Davoli, a cura di, *Il Recupero energetico e ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp. 126-132;
- * Camuffo D., *Microclimate for cultural heritage*, "Developments in Atmospheric Science 23", Elsevier, 1998;
- * Cetica P. A., *L'architettura dei muri intelligenti: esperienze di climatizzazione sostenibile dell'Ottocento*, Pentecorboli Editore, Firenze, 2004;
- * Chella F., *Retrofit energetico ed edificato storico*, in Forlani M.C., a cura di, "Cultura tecnologica e progetto sostenibile", Atti del workshop progettuale "Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano", organizzato da SITda, Pescara Caporciano 31 Maggio – 5 Giugno 2010, Alinea Editrice, Pescara, 2010, pp. 180-195;
- * Corti L., *Ristrutturazione e riqualificazione energetica*, in Atti del convegno CasaClima, Bolzano, 2011;
- * Dall'O' G., a cura di, *Gli impianti nell'architettura e nel restauro. Innovazione tecnologica e design per l'integrazione degli impianti negli edifici*, UTET, Torino, 2003;
- * Davoli P., a cura di, *Il recupero energetico ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010;

-
- * Davoli P., *Dalla teoria al progetto*, in Davoli P., a cura di, *Il recupero energetico ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp. 15-28;
 - * Davoli P., *Architettura senza impianti, aspetti bioclimatici dell'architettura preindustriale*, Alinea, Firenze, 1993;
 - * De Santoli L., *La riqualificazione energetica degli edifici storici*, Atti del Convegno *La riqualificazione energetica degli edifici storici*, «Illuminazioni» presso GreenBuilding, Verona 4 Maggio 2011;
 - * Fabbri K., *Prestazione energetica degli edifici. I metodi di calcolo secondo le norme UNI TS 11300*. DEI, Roma, 2009;
 - * Fathy H., *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and examples with reference to hot arid climates*, Published for The United Nations University by The University of Chicago Press Chicago and London, 1986;
 - * Felli P., *Introduzione*, in Forlani M.C., a cura di, "Cultura tecnologica e progetto sostenibile", Atti del workshop progettuale "Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano", organizzato da SITda, Pescara Caporciano 31 Maggio – 5 Giugno 2010, Alinea Editrice, pp. 4-5;
 - * Forlani M.C., a cura di, "Cultura tecnologica e progetto sostenibile", Atti del workshop progettuale "Idee e proposte ecosostenibili per i territori del sisma aquilano", organizzato da SITda, Pescara - Caporciano 31 Maggio – 5 Giugno 2010;
 - * Glassie H., *Vernacular Architecture*, Indiana University Press, 2000;
 - * Norrström H., Edén M., *Energy Efficiency and Preservation in our Cultural Heritage in Halland*, 2009, Sweden, 2010.
 - * Pasqua Recchia A., *Efficienza energetica e produzione da fonti rinnovabili tra tutela e sviluppo: linee guida per il patrimonio culturale*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, in Atti del Convegno *La riqualificazione energetica degli edifici storici*, «Illuminazioni» presso GreenBuilding, Verona 4 Maggio 2011;
 - * Picone A., *La casa araba d'Egitto. Costruire con il clima dal vernacolo ai maestri contemporanei*, Editoriale Jaca Book spa, Milano, 2009;
 - * Spanedda F., *Energia e insediamento: una ricerca interdisciplinare per l'applicazione di principi di efficienza energetica nei centri storici*, Franco Angeli: Milano, 2007;
 - * Tiozzo G., *Il Palladio e le ville Fluviali. Architettura e decorazioni*, Marsilio Editori, Venezia 1981.

Articoli in rivista

- * Adhikari R., Pracchi V., Rogora A., Rosina E., *La valutazione delle prestazioni energetiche negli edifici storici: sperimentazioni in corso*, in «ProgettoSostenibile», Edicom Edizioni, n. 28 Giugno 2011, pp. 20-
-

27;

- * Albero S., Giavarini C., Santarelli M.L., Vodret A., *CFD modeling for the conservation of the Gilded Vault Hall in the Domus Aurea*, ScienceDirect, «Journal of Cultural Heritage», 2003, pp. 197-203;
- * Arbizzani E., Avosani G., Calzolari M., Magarotto L., Vanucci C., *Riqualificazione urbana, funzionale ed energetico – ambientale del quartiere Barca di Bologna*, «L'ufficio tecnico», n. 9/2010, pp. VI-XIII;
- * Balocco C., *Daily natural heat convection in a historical hall*, «Journal of Cultural Heritage», ScienceDirect, 2007, pp. 370-376;
- * Balocco C., Grazzini G., *Numerical simulation of ancient natural ventilation system of historical buildings. A case study in Palermo*, «Journal of Cultural Heritage», 2009, pp. 1-8;
- * Belpoliti V., Boarin P., Calzolari M., *Borgo_Clima. Un processo di riqualificazione energetica e ambientale del tessuto storico*, «L'ufficio tecnico», n. 11-12/2010, pp. 16-22;
- * Belpoliti V., *Il rivestimento invisibile*, «Recupero e Conservazione», deLettera editore, Settembre 2009, p. 26;
- * Brunoro S., *Riqualificazione energetica – architettonica di edilizia storicizzata: un caso di best practice in provincia di Ferrara*, «Inarcos», Marzo 2011, pp. 23-28;
- * Calzolari M., *Riqualificazione energetica del secondo chiostro di S. Antonio in Polesine, Ferrara*, «Recupero e Conservazione», deLettera editore, Marzo 2009, p. 20;
- * Calzolari M., *L'involucro energetico trasparente. Sito museale Antiquarium, Alessandria*, «Recupero e Conservazione», deLettera editore, n. 90, Gennaio 2010, pp. 20-21;
- * Calzolari M., *Moderne tecnologie per edifici antichi. Integrazione del sistema impiantistico nel contenitore storico*, «L'ufficio tecnico», n. 4/2010, pp. 12-17;
- * Calzolari M., *Progettare gli impianti per l'edilizia storica*, «Recupero e Conservazione», deLettera Editore, n. 92, Maggio 2010, p. 24;
- * Calzolari M., *Riqualificazione energetica nell'edilizia storica. Uno studio interdisciplinare per la rifunzionalizzazione di S. Antonio in Polesine a Ferrara*, «Recupero e Conservazione», deLettera Editore, n. 92 Maggio 2010, pp. 40-48;
- * Calzolari M., *Nuova pelle per l'edificio storico. Cosa significa progettare un nuovo involucro per il paramento murario antico*, «L'ufficio tecnico», 03/2011, pp. 10-15;
- * Camuffo D., Bernardi A., Sturaro G., Valentino A., *The microclimate inside the Pollaiolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence*, Elsevier, «Journal of Cultural Heritage», volume 3, numero 2, 2001, pp. 155-161;
- * Cardinale N., Rospi G., Stazi A., *Energy and microclimatic performance of restored hypogeous buildings in south Italy: the Sassi distric of Matera*, ScienceDirect, «Building and Environment», Volume 45, issue 1,

2009, pp. 590-598;

* Davoli P., *Il restauro – energetico ambientale degli edifici storici. Un percorso progettuale fra antichi saperi, costruzioni tutelate e tecnologie innovative*, «Recupero e Conservazione», deLettera Editore, n. 90/91, Marzo 2010, pp. 54-65 e pp. 40-51;

* Davoli P., *E ora la riqualificazione energetica del costruito. Un intervento imprescindibile, complesso, allettante sul patrimonio edilizio variamente storicizzato*, «L'ufficio tecnico», n. 4/2007, pp. 27-36;

* Davoli P., *Il senso della riqualificazione energetica del patrimonio storico architettonico tutelato, in un momento di crisi economico-energetica e di complessità normativa*, «L'ufficio tecnico», n. 22/2009, pp. 28-43;

* Grinzato E., Bressan C., Marinetti S., Bison P.G., Bonacina C., *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*, «Infrared Physics & Technology», Elsevier, 2002, pp. 165-169;

* Grinzato E., Marinetti S., Bison P.G., *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*, Elsevier, «Journal of Cultural Heritage», 2002, pp. 21-29;

* Larsen P. K., Brostrom T., *Climate control in cultural heritage buildings in Denmark*, «Developments in climate control of historical buildings», Linderhof Palace, December 2, 2010, pp. 39-44;

* Shellen H., Neuhaus E., *Conservation heating in a historical building: results from an experimental and simulation study*, «Developments in climate control of historical buildings», Linderhof Palace, December 2, 2010, pp. 1-85;

* Vuerich E., Malaspina F., Barazutti M., Georgiadis T., Nardino M., *Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano, Italy): a pilot study*, ScienceDirect, «Microchemical Journal», volume 88, issue 2, 2008, pp. 218-223;

* Ryhl-Svendsen M., Padfield T., Smith V. A., De Santis F., *The indoor climate in historic buildings without mechanical ventilation system*, EU 5th Framework project «Microclimate Indoor Monitoring in Cultural Heritage Preservation» (MIMIC), pp. 899-901;

* Sijanec Zavrl M., *Analysis indoor Climate in Building Heritage in Slovenia*, Eureka EU 1383 Prevent project and national research projects, financed by the Ministry of Science and Technology of Slovenia, pp. 1-15;

* Sulaiman R., Schellen H., Hensen J.L.M., *Pilot study on indoor climate investigation and computer simulation in historical museum building: Amerongen Castle, the Netherlands*, «Journal of Design and Built Environment», volume 7, University of Malaya, 2010, pp. 75-94.

Studi e ricerche

-
- * Barnham B., Heath N. (sustainable Features), Pearson G. (Technical Energy Services), *Energy modelling analysis of a traditionally built Scottish tenement flat*, Changeworks for Historic Scotland, Ottobre 2008;
 - * Benatti F., *L'integrazione dei terminali impiantistici sulle coperture. Indicazioni metodologiche e progettuali per la definizione di interventi coerenti con il contesto urbano e ambientale*, tesi di Dottorato di Ricerca in ICAR/12, Facoltà di Architettura, Università degli studi di Ferrara, 2006;
 - * Bichlmair S., Kilian R., *Room climate in Linderhof Palace. Impact of ambient climate and visitors on room climate with a special focus on the bedchamber of King Ludwig II*, «Developments in climate control of historical buildings», Linderhof Palace, December 2, 2010;
 - * Bonora L., Calzolari M., *Riqualificazione funzionale, ambientale e energetica del secondo chiostro di S. Antonio in Polesine. Un nuovo polo culturale a Ferrara*, Tesi di laurea in Architettura, Ferrara, 2008;
 - * Chiovaro S., *Analisi e valutazioni condotte su un edificio storico dell'alta Marca Trevigiana*, in A.A.V.V., "La qualità delle prestazioni energetico – ambientali nella manutenzione dell'architettura storica, Linee guida", in Progetto A.T.T.E.S.S – Edilizia storica e sostenibilità ambientale, Metadistretto Veneto della Bioedilizia e Metadistretto veneto dei beni culturali, Treviso, 2011;
 - * Just A., 2011, *Healthy and Energy-efficient living in Traditional Rural Houses. Technical survey of Estonian houses*, Report structure, Tallinn University of technology, Department of Structural Design, pp. 1-31.

Energia e ambiente

Volumi e contributi in volume

- * A.A.V.V., *Nuove costruzioni e ristrutturazioni. Manuale LEED Italia*, GreenBuilding Council Italia, 2009;
 - * Belpoliti V., Bizzarri G., Calzolari M., *La trasmissione di calore attraverso sistemi fotovoltaici semitrasparenti integrati: valutazioni preliminari in regime dinamico su due casi studio dell'area ferrarese*, in Atti del IV Congresso Nazionale AIGE, Roma 26-27 Maggio 2010;
 - * Calzolari M., Zaffagnini T., Zannoni G., *Approcci interdisciplinari e problematiche invariante per la riqualificazione energetica e ambientale del patrimonio costruito nell'area mediterranea*, in Germanà M.L., a cura di, "Permanenze e innovazioni nell'architettura del mediterraneo. Ricerca, Interdisciplinarietà e Confronto di Metodi", atti del seminario estivo Osdotta 2010 "Permanenze e innovazioni nel Mediterraneo", Palermo, 15-17 Settembre 2010, pp. 97-100;
 - * Frantz J., *Grüne Klimaanlagen*, atto del convegno Casaclima, Bolzano, 2008;
 - * Rava P., a cura di, *Tecniche costruttive per l'efficienza energetica e la sostenibilità*, Maggioli editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2007;
-

-
- * Rinaldi E., Zanini V., *Social housing: strategie di recupero energetico e sociale per un complesso residenziale a Ravenna*, in Davoli P., a cura di, *Il recupero energetico ambientale del costruito*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2010, pp. 133-140;
 - * Travisi A., a cura di, *Efficienza energetica in edilizia*, Maggioli editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2007;
 - * Tucci F., *Tecnologia e natura*, Alinea, Firenze, 2009;
 - * Zaffagnini M., *Case della grande pianura*, Alinea, Firenze, 1997.

Articoli in rivista

- * Anderson B., *Thermal properties of building structures*, in «Chartered Institution of Building services Engineers», 2006. CIBSE guide A: environmental design. 7th ed. London: CIBSE. Ch3;
- * Calzolari M., *Climatizzare con il verde*, «Recupero e Conservazione», deLettera editore, n. 88, Settembre 2009, p. 23;
- * Hens H., Verbeeck G., Verdonck B., *Impact of energy efficiency measures on the CO2 emission in the residential sector, a large scale analysis*. In «Energy and buildings», volume 33, issue 3. Febbraio 2001, pp. 275-281;
- * Rugginenti S. e Franchini C., *LEED: un approccio olistico alla certificazione energetica. Metodologia di un rating system per gli edifici storici*, «Il Progetto Sostenibile», n. 27/2011, pp. 42-47;
- * Tronchin L., Fabbri K., Round Robin A., *Test for buildings energy performance in Italy*. In «Energy and Buildings». Volume 42, Issue 10, October 2010.

Studi e ricerche

- * Belpoliti V., *Riqualificazione energetica nell'edilizia sociale*, Dottorato di Ricerca in Tecnologie chimiche ed energetica, Università degli studi di Udine, Università degli studi di Ferrara e Acer (Azienda casa Emilia Romagna) di Reggio Emilia, 2011.

Normativa di riferimento

- * *Legge 373/1976*: Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici;
 - * *Legge quadro 308/1982*: Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l'esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi;
 - * *Legge 10/1991*: Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia;
 - * *Direttiva 2002/91/CE del 16 Dicembre 2002*: Sul rendimento energetico nell'edilizia;
-

-
- * *D.Lgs n. 192 del 19 Agosto 2005*: Attuazione della direttiva 91/2002/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia;
 - * *D.Lgs 311/2006*: Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 192/2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia;
 - * *D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009*: Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 192/2005, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia;
 - * *D.M. del 26 Giugno 2009*: *Linee guida per la certificazione energetica degli edifici*;
 - Direttiva 2010/31/UE del 19 maggio 2010*: *Sulla prestazione energetica in edilizia*;
 - * UNI EN ISO 13788:2003: Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale;
 - * UNI EN ISO 13790:2008: Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione;
 - * UNI TS11300 parte 1-2, 2008: Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
 - * CEN/TR 14788: diverse tipologie dei sistemi di ventilazione;
 - * UNI EN 12792: ventilazione degli edifici – simboli, terminologia e simboli grafici.

Siti web

- * Blanc P., *Vertical garden*, www.verticalgardenpatrickblanc.com, 2008;
- * Comitato Termotecnico Italiano: www.cti2000.it;
- * Climate for Culture, <http://www.climateforculture.eu/>;
- * Change Works – Resources for Life, www.changeworks.org.uk;
- * Creative Energy Homes. www.creative-energy-homes.co.uk;
- * Design Builder: www.designbuilder.co.uk;
- * Docet Enea: www.docet.itc.cnr.it;
- * Edinburgh World Heritage (EWH), <http://www.ewht.org.uk/>;
- * Energy Saving Trust (UK), www.energysavingtrust.org.uk;
- * <http://eu-chic.eu/index.php>, Euchic (Cultural Heritage Identity Card);
- * Historic Scotland-Conservation Group (www.historic-scotland.gov.uk);
- * ISTAT, <http://www.istat.it/it/>;
- * Metaditretto della Bioedilizia, <http://www.attess.it/>: A.T.T.E.S.S. Edilizia storica e sostenibilità;
- * MC Impianti (Master Clima): www.masterclima.info;

- * Office of environmental Affairs by Synertech system Corporation,
www.synertechcorporationsystemcorp.com;
- * Premo Ottimizzazione energetica nelle ristrutturazioni,
www.provincia.bz.it/acque,energia/energia/ottimizzazione-energetica.asp;
- * Progetto A.T.T.E.S.S, www.attess.it;
- * Progetto Helth, <http://helthproject.eu>;
- * Perpetuate (Performance – based Approach to Earthquake Protection of Cultural Heritage in European and Mediterranean Countries, <http://www.perpetuate.eu/>
- * School of the Built Environment, Univeristy of Nottingham,
www.nottingham.ac.uk/engineering/departments/ab;
- * SECHURBA (Sustainable energy communities in historic urban areas), www.sechurba.eu;
- * Smoohs (Smart Monitoring of Historic Structures), <http://www.smoohs.eu/tiki-index.php>;
- * University of Nottingham - Departement of Built Environment):
<http://www.nottingham.ac.uk/engineering/Departments>;
- * Università degli studi di Ferrara - Centro Ricerche Architettura>Energia. Dipartimento di Architettura:
www.unife.it/centro/architetturaenergia;
- * Università degli studi di Ferrara - Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra:
<http://www.unife.it/dipartimento/fisica>.

Appendice A. Normative regionali

Di seguito si propone un breve quadro riassuntivo delle normative in materia di efficienza energetica, di riferimento per le regioni italiane.

Basilicata

- Legge Regionale n. 28 del 28-12-2007 "Disposizioni per la formazione del Bilancio di Previsione Annuale e Pluriennale della Regione Basilicata – Legge Finanziaria 2008"
- Legge Regionale: "Disposizioni per la formazione del Bilancio di Previsione Annuale e Pluriennale della Regione Basilicata Legge Finanziaria 2010".

Bolzano (Provincia autonoma)

- Decreto del Presidente della Provincia 29 settembre 2004, n. 34 "Regolamento di esecuzione della legge urbanistica in materia di risparmio energetico"
- Decreto del Presidente della Provincia n. 34 Modifiche 2009
- Deliberazione della giunta provinciale del 15 giugno 2009, n. 1609 "Direttive ai sensi dell'articolo 127 comma 2 della legge urbanistica provinciale, legge provinciale 11 agosto 1997, n. 13 e successive modifiche (Riqualificazione energetica di edifici esistenti con ampliamento)
- Deliberazione della Giunta Provinciale del 27 luglio 2009 n. 1969 "Certificato energetico per appartamenti"

Emilia Romagna

- Delibera di Assemblea Legislativa Regionale 4 marzo 2008 n. 156 "Atto di indirizzo e coordinamento sui requisiti di rendimento energetico e sulle procedure di certificazione degli edifici"
- Delibera di Giunta Regionale 7 luglio 2008 n. 1050 - "Sistema di accreditamento dei soggetti preposti alla certificazione energetica degli edifici"
- Delibera di Giunta n. 1754/2008 - "Disposizioni per la formazione del certificatore energetico in edilizia in attuazione della deliberazione dell'assemblea legislativa n. 156/08"

-
- Delibera di Giunta Regionale 21 settembre 2009 n. 1390 "Modifica agli allegati tecnici della Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 156/2008"
 - DAL n. 255 del 6/10/2009 di modifica alla deliberazione dell'Assemblea legislativa n. 156/2008
 - DGR n. 1362/2010 "Modifica degli Allegati di cui alla parte seconda della DAL 156/08"

Friuli-Venezia Giulia

- Legge 18 agosto 2005, n.23 "Disposizioni in materia di edilizia sostenibile"
- Delibera n.2116 del 24 settembre2009 "Legge regionale 23/2005, art.6, comma 1 (disposizioni in materia di edilizia sostenibile) che istituisce il "protocollo regionale per la valutazione della qualità energetica ed ambientale di un edificio quale strumento attuativo di cui si dota la regione per disciplinare la valutazione del livello di sostenibilità degli interventi edilizi: approvazione del protocollo regionale VEA per la valutazione della qualità energetico ambientale degli edifici. Approvazione definitiva.
- Protocollo VEA per la Valutazione della qualità Energetica e Ambientale degli edifici.
- D.P. Reg. 25 settembre 2006 n. 288 Regolamento concernente i criteri e le modalità per la concessione dei contributi previsti dagli articoli 12 e 13, comma 4 della legge regionale 18 agosto 2005, n. 23 (Disposizioni in materia di edilizia sostenibile), per la dotazione di strumenti di indagine territoriale in materia di bioedilizia.
- D.P. Reg. 1 ottobre 2009 n. 274 Regolamento recante le procedure per la certificazione VEA di sostenibilità energetico ambientale degli edifici, di cui all'articolo 6 bis, della legge regionale 18 agosto 2005, n. 23, "Disposizioni in materia di edilizia sostenibile".
- D.P. Reg. 25 agosto 2010 n. 199 Regolamento recante il sistema di accreditamento dei soggetti abilitati alla certificazione VEA di cui all'articolo 1 bis della legge regionale 23/2005 (Disposizioni in materia di edilizia sostenibile) e modifiche al Regolamento recante le procedure per la certificazione VEA emanato con DPRReg. 274/2009.

Lazio

- Legge 27 maggio 2008, n.6 "Disposizioni regionali in materia di architettura sostenibile e bioedilizia"
 - Deliberazione Giunta Regionale 7 agosto 2009, n. 634 Approvazione dei criteri relativi al Protocollo
-

regionale sulla bioedilizia di cui all'articolo 7 della legge regionale 7 giugno 2008, n. 6 e definizione successivi adempimenti

- Deliberazione Giunta Regionale 5 febbraio 2010, n.72 Approvazione dello schema di regolamento regionale "Sistema per la Certificazione di sostenibilità ambientale degli interventi di bioedilizia e l'accreditamento dei soggetti certificatori"
- Deliberazione Giunta Regionale 5 marzo 2010, n.133 Adozione del «Protocollo ITACA Regione Lazio» residenziale e del «Protocollo ITACA Regione Lazio» non residenziale, ai sensi della legge regionale n. 6 del 27 maggio 2008, Capo III, art. 7, comma 4»

Liguria

- Legge Regionale n. 22 del 29 maggio 2007 e ss.mm.ii "Norme in materia di energia"
- Regolamento Regionale n. 1 del 22 gennaio 2009 "Regolamento di attuazione articolo 29 della legge regionale 29 maggio 2007 n. 22 recante: 'Norme in materia di certificazione energetica degli edifici'. Sostituzione del regolamento regionale n. 6 del 8.11.2007"
- Deliberazione di giunta regionale n. 1601 del 2 dicembre 2008 "Certificazione energetica degli edifici: elenco dei professionisti e corsi di formazione"
- Deliberazione di Giunta regionale n. 1254 del 21 settembre 2009 "Modifiche degli allegati alla d.G.R. 1601/08 "Certificazione energetica degli edifici/elenco dei professionisti e corsi di formazione"

Lombardia

- Legge Regionale n.26 del 20/04/1995 "Nuove modalità di calcolo delle volumetrie edilizie e dei rapporti di copertura limitatamente ai casi di aumento degli spessori dei tamponamenti perimetrali e orizzontali per il perseguimento di maggiori livelli di coibentazione termo acustica o di inerzia termica"
- Legge Regionale n.24 dell'11/12/2006 "Norme per la prevenzione e la riduzione delle emissioni in atmosfera a tutela della salute e dell'ambiente"
- Deliberazione Giunta Regionale n. VIII/5018 del 26/06/2007 "Determinazioni inerenti la certificazione energetica degli edifici, in attuazione del d.lgs. 192/2005 e degli art. 9 e 25 della l.r. 24/2006"
- Deliberazione Giunta Regionale n. VIII/5773 del 31/10/2007 "Certificazione energetica degli edifici -

.....

Modifiche ed integrazioni alla DGR n.5018/2007"

- Decreto n. 15833 del 13/12/2007 "Aggiornamento della procedura di calcolo per predisporre l'attestato di certificazione energetica degli edifici, previsto con DGR 5018/2007 e successive modifiche ed integrazioni"
- Decreto n.16381 del 27/12/2007 "Approvazione della circolare relativa alla necessità di certificazione energetica per gli immobili oggetto di incentivi o agevolazioni"
- Decreto 8935 del 07/08/2008 "Approvazione della circolare relativa all'applicazione della L.R. 26/1995 e al rapporto con l'art. 11 del D.LGS. 115/2008"
- Deliberazione Giunta Regionale n. VIII/8745 del 22/12/2008 "Determinazioni in merito alle disposizioni per l'efficienza energetica in edilizia e per la certificazione energetica degli edifici"
- Decreto n.2598 del 18/03/2009 "Approvazione del nuovo modello di targa energetica per gli edifici, in riferimento alla DGR 5018/2007"
- Decreto n.4648 del 12/05/2009 "Definizione dei criteri per accreditare come certificatori energetici ai sensi della DGR 5018/2007 e s.m.i. i professionisti già accreditati da altre Regioni, Province Autonome e Paesi appartenenti all'UE"
- Decreto 5796 del 11/06/2009 "Aggiornamento della procedura di calcolo per la certificazione energetica degli edifici"
- Legge Regionale n. 10 del 29/06/2009 "Disposizioni in materia di ambiente e servizi di interesse economico generale - Collegato ordinamentale"
- Decreto n. 7148 del 13/07/2009 "Precisazioni in merito all'applicazione delle disposizioni per l'efficienza energetica in edilizia, approvate con DGR n. 8745 del 22/12/2008"
- Legge Regionale n. 13 del 16/07/2009 "Azioni straordinarie per lo sviluppo e la qualificazione del patrimonio edilizio ed urbanistico della Lombardia"
- Decreto n. 7538 del 22/07/2009 "Rettifica delle precisazioni approvate con Decreto 7148 del 13.07.2009, relative all'applicazione delle disposizioni per l'efficienza energetica in edilizia, di cui alla DGR 8745 del 22.12.2008"
- Deliberazione Giunta Regionale n. IX/335 del 28/07/2010 "Certificazione energetica edifici pubblici: aggiornamento del termine finale"
- Legge regionale 21 febbraio 2011, n. 3 "Interventi normativi per l'attuazione della programmazione regionale e di modifica e integrazione di disposizioni legislative – Collegato ordinamentale 2011"

Marche

- Legge 17 giugno 2008, n.14 "Norme per l'edilizia sostenibile"
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1499 del 28/09/2009: LR n. 14/2008 - DGR 760/2009 e DGR 1141/2009 - Procedure regionali per l'accreditamento dei certificatori della sostenibilità energetico ambientale.
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1870 del 16/11/2009: Protocollo Itaca - Marche sintetico, LR 22/2009 "Interventi della Regione per il riavvio delle attività edilizie al fine di fronteggiare la crisi economica, difendere l'occupazione, migliorare la sicurezza degli edifici e promuovere tecniche di edilizia sostenibile", scaglioni per la realizzazione degli incrementi volumetrici, procedure e controlli per la valutazione della sostenibilità degli edifici.
- Deliberazione Giunta Regionale n. 359 del 01/03/2010: Art. 6 della L.R. n. 14/2008 - DGR 1141/2009 - Procedure regionali del sistema di certificazione della sostenibilità energetica e ambientale degli edifici, approvazione procedure integrative e relativa modulistica.
- Deliberazione Giunta Regionale n. 361 del 01/03/2010: Art. 4 lett. e) della LR n. 14/2008 - DGR 760/2009 all. 3 - DGR 1499/2009 - Piano di formazione e procedure per l'accreditamento dei certificatori della sostenibilità energetica e ambientale degli edifici, modifiche e integrazioni.
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1244 del 02/08/2010 "Articolo 4 lett. e) della LR n. 14/2008; DGR n. 361/2010 allegato 1 punto 8, DGR n. 760/2009 allegato 2, modifiche e integrazioni."
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1245 del 02/08/2010 "Aggiornamento Protocollo Itaca - Marche sintetico per la valutazione energetico ambientale degli edifici"
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1494 del 18/10/2010 "Art. 14 comma 3 lett. b) della LR 14/2008 "Norme per l'edilizia sostenibile" - Sistema e procedure per la certificazione energetica e ambientale degli edifici di cui all'art. 6, comma 5 - Sostituzione DGR 1141/2009"

Piemonte

- Legge regionale n.13 del 28 maggio 2007 "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia."
- Deliberazione Giunta Regionale n. 43-11965 del 4/08/2009. "Disposizioni attuative in materia di certificazione energetica degli edifici ai sensi dell'art.21, comma 1, lettere d), e) ed f)"

-
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1-12374 del 20/10/2009 "Modifiche ai Paragrafi 3.2., 4.1, 4.2, 4.4 e 5.1. dell'Allegato alla deliberazione della Giunta regionale 4 agosto 2009, n. 43- 11965 in materia di certificazione energetica degli edifici"
 - Deliberazione Giunta Regionale n. 11-330 del 19 luglio 2010 "Modifiche ai Paragrafi 4.3. e 4.4 dell'Allegato alla deliberazione della Giunta regionale 4 agosto 2009, n. 43-11965 in materia di certificazione energetica degli edifici e s.m.i."
 - D.D. n. 446 del 1° ottobre 2009 "Approvazione aspetti metodologici e operativi in materia di certificazione energetica ai sensi della D.G.R. 4 agosto 2009, n. 43-11965 recante disposizioni attuative della L.R. 28 maggio 2007, n. 13 e s.m.i."
 - Circolare della Presidente della Giunta Regionale 25 gennaio 2010, n.1/AMB "Certificazione energetica degli edifici. Chiarimenti in merito ai requisiti dei certificatori"

Puglia

- Legge regionale 30 luglio 2009, n. 14 "Misure straordinarie e urgenti a sostegno dell'attività edilizia e per il miglioramento della qualità del patrimonio edilizio residenziale"
- Legge regionale n. 13 del 10 giugno 2008, "Norme per l'abitare sostenibile"
- Linee Guida per la prima applicazione del Regolamento regionale 10 febbraio 2010, n. 10, recante disposizioni in materia di certificazione energetica degli edifici ai sensi del D. Lgs. 19 agosto 2005, n. 192"
- Regolamento regionale 10 febbraio 2010, n. 10 "Regolamento per la certificazione energetica degli edifici ai sensi del D.Lgs. 19 agosto 2005 n. 192" - Accredimento Certificatori Energetici degli Edifici Regione Puglia. Approvazione Linee Guida Procedura Telematica"
- Deliberazione della giunta regionale 13 aprile 2010, n. 1008 "D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 "Attuazione della direttiva 2000/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia". Regolamento per la certificazione energetica degli edifici. Regolamento regionale 10 febbraio 2010, n. 10. Corsi di Formazione Professionale. Procedure per l'autorizzazione. Approvazione"
- Deliberazione Giunta Regionale 4 agosto 2009, n. 1471 " Sistema di valutazione del livello di sostenibilità ambientale degli edifici in attuazione della Legge Regionale "Norme per l'abitare sostenibile"

Sicilia

- Decreto 3 marzo 2011 "Disposizioni in materia di certificazione energetica degli edifici nel territorio della Regione siciliana"

Toscana

- Legge 24 febbraio 2005 n.39 "Disposizioni in materia di energia"
- Legge regionale 23 novembre 2009, n. 71 "Modifiche alla legge regionale 24 febbraio 2005, n. 39 (Disposizioni in materia di energia)"
- Decreto del presidente della giunta regionale 25 febbraio 2010, n. 17/R "Regolamento di attuazione dell'articolo 23 sexies della legge regionale 24 febbraio 2005, n. 39 (Disposizioni in materia di energia) Disciplina della certificazione energetica degli edifici. Attestato di certificazione energetica"

Trento (Provincia autonoma)

- Legge 4 marzo 2008 n.1 "Pianificazione urbanistica e governo del territorio"
- Decreto del presidente della provincia 13 luglio 2009, n. 11- 13/Leg "Disposizioni regolamentari in materia di edilizia sostenibile in attuazione del titolo IV della legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1 (Pianificazione urbanistica e governo del territorio)
- Deliberazione della giunta provinciale n. 2446 del 16 ottobre 2009 "Approvazione delle prime misure attuative del decreto del Presidente della Provincia 13 luglio 2009, n. 11-13/Leg. [Disposizioni regolamentari in materia di edilizia sostenibile in attuazione del titolo IV della legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1 (Pianificazione urbanistica e governo del territorio)]
- Deliberazione della giunta provinciale n. 3110 del 22 dicembre 2009 "Approvazione di ulteriori misure attuative del decreto del Presidente della Provincia 13 luglio 2009, n. 11-13/Leg. recante "Disposizioni regolamentari in materia di edilizia sostenibile in attuazione del titolo IV della legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1 (Pianificazione urbanistica e governo del territorio)"
- Deliberazione della giunta provinciale n. 1429 del 17 giugno 2010 "Applicazione dell'obbligo di certificazione energetica di cui al comma 3 dell'art. 13 delle "Disposizioni regolamentari in

materia di edilizia sostenibile in attuazione del titolo IV della legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1", emanate con decreto del Presidente della Provincia 13 luglio 2009, n. 11-13/Leg"

Umbria

- Legge Regionale n.17 del 18.11.2008 "Norme in materia di sostenibilità ambientale degli interventi urbanistici ed edilizi"
- Legge Regionale n.13 del 26.06.2009 "Norme per il governo del territorio, la pianificazione e per il rilancio dell'economia attraverso la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente"

Valle d'Aosta

- Legge 18 aprile 2008, n.21 " "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia"
- Deliberazione Giunta Regionale n. 3014/2009 "Approvazione delle definizioni integrative, dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e delle prescrizioni previsti, rispettivamente, dagli articoli 2, 6 e 15, commi 1 e 2, della legge regionale 18 aprile 2008, n. 21 (Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia)"
- Deliberazione Giunta Regionale n. 1448/2010 "approvazione, ai sensi dell'articolo 10, comma 1, lettera b, della l.r. 21/2008 e successive modificazioni, delle modalità di riconoscimento dei corsi di formazione utili ai fini dell'accreditamento dei soggetti fisici abilitati al rilascio dell'attestato di certificazione energetica degli edifici
- Deliberazione Giunta Regionale n. 2236/2010 "Approvazione, ai sensi degli articoli 9, 10 e 11 della l.r. 21/2008 e successive modificazioni, delle modalità di accreditamento di soggetti fisici abilitati al rilascio dell'attestato di certificazione energetica degli edifici e di soggetti ispettori"

Deliberazione Giunta Regionale n 3629/2010 " Approvazione di ulteriori definizioni integrative dell'allegato a della dgr 3014/2009, degli indicatori climatici, delle metodologie per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici e relative semplificazioni di cui agli articoli 2, 4 e 7 della l.r. 18 aprile 2008, n. 21 (disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia).

APPENDICE B. Casi studio della ricerca *Energy Efficiency Historic Homes*, Regno Unito (UK)

Mill Farm, Assington, Suffolk

Grade II listed farmhouse

Proprietari: Bob e Anne Cowlin

Costruttore: Jhon Bradshaw, Assington

Architetto: Hilary Brightman, Maldon, Essex

L'esterno della vecchia fattoria è rivestito da doghe di legno, mentre la copertura è finita con una lamiera ondulata. Sul lato sud-ovest si nota un piccolo ampliamento, sgradevole rispetto all'impianto originale.

Il primo piano è stato porzionato per creare più camere da letto piccole, la maggior parte delle quali si affaccia a nord-est.

Interventi:

- è stata demolito l'ampliamento ed è stato riorganizzato il primo piano per affacciare tutte le camere da letto verso sud-ovest, creando il corridoi di distribuzione sul lato nord-est;
- è stata realizzata una veranda vetrata su tutta la lunghezza del prospetto sud-ovest per avere guadagno termico passivo;
- per non modificare l'immagine delle finestre originarie (tipiche del Yorkshire) è stato aggiunto un secondo vetro con telaio ligneo per aumentare l'isolamento termico e acustico delle aperture;
- tutti i materiali utilizzati sono stati scelti per essere compatibili con le strutture antiche e non alterare l'equilibrio di porosità e umidità esistente. Pertanto la copertura è stata isolata con uno spessore molto ridotto (450mm) per un valore di $U=0.09 \text{ W/m}^2\text{K}$, le pareti sono state isolate con lana per una $U=0.31 \text{ W/m}^2\text{K}$ e il solaio in cemento è stato rimosso e sostituito con uno isolato con granuli di argilla espansa;
- l'ampliamento demolito è stato sostituito con una nuova costruzione lignea (*ballomframe*) isolata con pannelli di paglia, mescolata ad argilla e gesso.

Dolbelydr, Denbigh, North Wales

Casa della piccola nobiltà di XVI secolo

Proprietario: Landmark Trust

Architetto: Andrew Thomas

Dolbelydr è un buon esempio di casa nobiliare costruita tra il 1579 e il 1580. Storicamente è importante perché è il posto dove è stata scritta la prima grammatica di lingua gallese mentre lo è da un punto di vista architettonico perché non è mai stato modificato e presenta ancora le caratteristiche originali. Questi aspetti giustificano le alte spese per la ricostruzione delle parti andate in rovina.

Le pareti esterne sono costruite con malta di calce per uno spessore di 700 mm. La copertura, fatta con legno di quercia è rivestita con mattonelle di arenaria. Le finestre sono poche e piccole e frammentate in specchiature di ridotte dimensioni e singolo vetro. Il solaio a terra è composto da lastre di ardesia poggiate direttamente sulla terra.

Interventi:

- l'edificio è stato trasformato in un ricovero per turisti, dando particolare risalto agli aspetti storici del fabbricato;
- è stato installato un boiler ad olio in una centrale esterna che produce l'acqua calda per l'edificio mentre per il riscaldamento del piano terra si è optato per un pavimento radiante sfruttando lo spessore sottile del solaio ed eliminando i radiatori;
- la copertura è stata isolata con 50 mm di lana di pecora mentre il solaio a terra è stato isolato con 150 mm di argilla espansa.

Berg Cottage, Hertfordshire

Grade II listed 17th century timber-frame cottage

Proprietario: National Trust

Building surveyor: Richard Oxley

Consulente energetico: Peter Warm

L'edificio è stato costruito nel 1687 ed è ad oggi di proprietà della National Trust. Ha un tetto di paglia, i prospetti principali sono intonacati, mentre le doghe di legno di quello sul retro sono imbarcate dalle intemperie e dal tempo. Sono già stati sostituiti i pannelli elettrici per il riscaldamento perché inefficaci con una nuova caldaia a condensazione e radiatori. L'installazione di pannelli di cemento e pitture impermeabili fatta negli anni '30 ha gravemente nociuto alle strutture lignee.

Interventi:

- è stato fatto un test della pressione, e con l'aiuto di una *smoke pen* sono stati individuati i punti con le infiltrazioni d'aria più gravi, da risolvere senza rendere l'edificio troppo ermetico. Il test ha evidenziato un ricambio di 24 volumi d'aria l'ora, eccessivo anche per evitare problemi di umidità alle strutture. Pertanto le

- infiltrazioni maggiori sono state eliminate chiudendo i buchi con la calce;
- le tavole di legno esterne più rovinate sono state sostituite ed è stata creata una camera ventilata retrostante per evitare il replicarsi del problema con isolamento in lana di pecora;
 - all'interno è stata conservata la finitura originale (*plaster on lath*) a vista.

Dymock's Building, Bo'ness, Central

Scotland 17th century to 19th century structures, now flats. Category A listing

Proprietario: National Trust for Scotland's Little Houses Improvement Scheme

Main Contractor: Hunter and Clark, Glasgow

Architetto: The Pollock Hammond Partnership, Linlithgow

Fruitore: Castle Rock Housing Association

Negli ultimi tempi, prima dell'intervento, l'edificio era stato abbandonato. La National Trust ha ritenuto che questa fosse una buona occasione per dare una nuova vita all'edificio e alla cittadina stessa. Così l'edificio è stato recuperato per farne appartamenti da affittare, con una sola camera da letto e adatti ad ospitare, se richiesto, persone con disabilità.

Interventi:

- sono stati riprogettati gli spazi interni per creare le nuove abitazioni, inclusa l'installazione di un ascensore per superare i tre piani dell'edificio;
- l'involucro dell'edificio è costituito da pareti in arenaria rovinate dal tempo e una copertura risalente al XVIII secolo con struttura di pino coperta con pannelli di cemento. Pertanto è stato sostituito il solaio a terra con un nuovo isolato e impermeabilizzato, mentre le pareti esterne sono state ricoperte con intonaco di calce idraulica. La struttura interna è stata per la maggior parte rimossa perché in gravi condizioni ed è stata sostituita con una nuova struttura indipendente di legno realizzata per sostenere i nuovi solai isolati. Per evitare la formazione di condensa generata dal nuovo isolamento è stata aggiunta una barriera al vapore. La copertura è stata isolata con isolante d'argilla;
- molte delle finestre originali sono andate perdute, pertanto sono stati realizzati nuovi infissi in memoria dei precedenti;
- è stato installato un impianto con caldaia a condensazione centralizzato.

Neely House, Cambridge

Two Victorian terraced House

Proprietario: Famiglia Neely

Architetto: Gale & Snowedn

La famiglia Neely desiderava ampliare la propria abitazione. L'occasione è nata quando il vicino della casa limitrofa ha messo in vendita l'abitazione. Così le due case Vittoriane furono rinnovate e convertite in un'unica grande abitazione, intervenendo su di esse con attenzione al risparmio energetico.

Interventi:

- il progetto ha previsto: ingresso con ripostiglio, grande soggiorno, una cucina, sala da pranzo, camera gioco per i bambini, lavanderia, cinque camere da letto, due bagni, sottotetto abitabile, cantina per il vino e un patio esterno;
- sono stati utilizzati solo prodotti naturali, legno, cera e ardesia e si è valorizzata l'illuminazione e la ventilazione naturale;
- le pareti sono state isolate dall'interno usando isolante a base di lino (100 mm), mentre per il sottotetto è stato usato isolante riflettente;
- le finestre sul retro sono state sostituite con triplo vetro con gas argon, mentre sul fronte è stato preferito un doppio vetro e telaio in legno che divide l'apertura in due specchiature, nel rispetto dell'immagine originale;
- è stata installata una caldaia a condensazione con pannelli radianti al piano terra e radiatori al primo piano.

Wood Farm, Gipping, Suffolk

16th century grade II listed farmhouse

Proprietario: Privato

Architetto: Geary and Black

Come molte altre, anche questa fattoria ha subito nel tempo diverse alterazioni e prima dell'intervento era in un grave stato di degrado (in particolare il basamento a causa dell'umidità). Oltre alla costruzione di un ampliamento in quercia verde, l'edificio è stato oggetto di un intervento di riqualificazione energetica.

Interventi:

- la copertura, costruita con una struttura in cemento coperta da un sottile strato di lana minerale e una guaina bituminosa è stata isolata con 300 mm di incanniccato sopra una barriera al fuoco. Il sottotetto è

stato isolato, invece, con 200 mm di lana minerale;

- le pareti hanno creato qualche problema: infatti la tipica struttura interna (wattle and daub) era deteriorata per il 50% dell'intera area. Per cui è stata tutta recuperata e sistemata e in parte isolata con lana minerale. All'esterno sono stati installati nuovi pannelli di compensato, una membrana impermeabile e per finire una struttura di assicelle ventilate coperta con tre mani di intonaco di calce arerata;
- è stata installata una nuova caldaia a condensazione.

▪

▪

APPENDICE C. Tecniche di misura del coefficiente globale di scambio termico in edifici storici.

C - 1. Modelli matematici per il transitorio

Lo studio delle tecniche di misura prevede anche quella dello studio del transitorio di riscaldamento dell'edificio. A questo proposito si ritiene opportuno analizzare come può essere modellizzata la fase di riscaldamento, usando differenti approssimazioni.

Corpo omogeneo riscaldato dall'interno

Un corpo omogeneo è caratterizzato da una capacità termica C e da una resistenza termica R di scambio con l'esterno. Si assume, in prima approssimazione, che la temperatura interna del corpo sia omogenea. La fase iniziale di riscaldamento incrementerà la differenza di temperatura tra interno ed esterno e, simultaneamente all'aumentare di temperatura, inizierà lo scambio termico con l'esterno. Un processo di questo tipo, noto in letteratura, è descritto dalla seguente relazione:

$$\Delta t = P \times R \times \left(1 - e^{-\frac{t}{R \times C}} \right) \quad (1)$$

Il prodotto R*C è noto anche come *costante termica del sistema*. Per t (temperatura) che tende all'infinito si ri-ottiene la precedente relazione all'equilibrio termico:

$$\Delta t = P \times R \times \left(1 - e^{-\frac{t}{R \times C}} \right) \text{ con } t \rightarrow \infty \rightarrow \Delta t = P \times R \quad (2)$$

La fase di raffreddamento sarà caratterizzata dalla relazione:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{iniziale}} \times e^{-\frac{t}{R \times C}} \quad (3)$$

E' importante evidenziare che la fase di riscaldamento contiene il prodotto RC e non R singolarmente, come vedremo meglio nell'elaborazione dati, pertanto questa fase non è utile per la misura del coefficiente

di scambio termico. Non conoscendo il valore di C a priori non possiamo ricavare R.

Involucro non omogeneo

Un edificio non è un corpo omogeneo, in quanto è costituito da un involucro, caratterizzato da una propria capacità termica, e da un volume interno di aria, che presenta una diversa capacità termica. Inoltre in un edificio il contributo alla resistenza termica deriva da diverse accoppiamenti di materiale:

- resistenza termica di convezione fra la fonte di calore e l'aria interna; - resistenza termica di convezione fra aria interna e muri; - resistenza termica del solo involucro; - resistenza termica di convezione fra muri ed ambiente esterno.

Nella valutazione dello scambio termico globale, tutti questi contributi sono mescolati a caratterizzare la resistenza globale di scambio termico, parametro dal quale è possibile estrarre il coefficiente di scambio termico globale. Assumiamo, quindi, di poter modellizzare l'edificio come un sistema costituito da:

- una capacità termica del volume di aria (C_{Aria}) e una corrispondente costante di tempo $R'C'$;
- una capacità termica dell'involucro (C_{Muri}) e una corrispondente costante di tempo $R''C''$;

Il transitorio di riscaldamento di un sistema di questo tipo può quindi essere modellizzato con una doppia funzione esponenziale:

$$\Delta t = (P \times R) + \left(A \times e^{-\frac{t}{R' \times C'}} \right) + \left(B \times e^{-\frac{t}{R'' \times C''}} \right) \times C'' \quad (4)$$

Anche in questo caso, all'equilibrio termico ritroviamo la stessa relazione. Le singole costanti di tempo saranno funzioni di tutte le capacità termiche e delle resistenze termiche che caratterizzano il sistema in questione. Con un transitorio di questo tipo, l'esponenziale con la costante di tempo più piccola contribuisce maggiormente nella fase iniziale, quindi nella fase di riscaldamento dell'aria, mentre l'altra esponenziale contribuisce maggiormente a tempi più grandi quando diventa importante il riscaldamento dei muri.

I risultati sperimentali, come vedremo, sembrano indicare che per essere in grado di distinguere le due esponenziali si deve avere un rapporto:

$$C_{muri} / C_{aria} > 10^3$$

Per capacità termica più simili, entro quindi due ordini di grandezza, le due esponenziali sono talmente

“simili” da non essere distinguibili. È importante mettere in evidenza che si può sempre associare al modello termico un equivalente circuito elettrico secondo il seguente schema:

- capacità termica → capacità elettrica
- resistenza termica → resistenza elettrica
- $\Delta T \rightarrow \Delta V$ (differenza di temperatura → differenza di potenziale elettrico)
- $P \rightarrow I$ (potenza fornita, quindi flusso di calore → corrente elettrica)

Le espressioni *singola esponenziale* e *doppia esponenziale*, viste sopra, sono le soluzioni delle equazioni differenziali associate ai transitori dei circuiti elettrici equivalenti. È interessante, inoltre, valutare la risposta del circuito elettrico equivalente in termini di sviluppo in serie di Fourier in particolari condizioni (test della curva di inseguimento).

C - 2 Curva di riscaldamento – Modello A

Sul box di polistirene sono stati eseguiti diversi test di curva di riscaldamento usando fonti di calore con diversa potenza e usando due diverse configurazioni di pareti. Nel primo caso, usando il box a pareti singole, mentre nel secondo con pareti doppie. In tutti i test si è determinato il coefficiente H apportando diverse correzioni per la variazione della temperatura esterna come schematizzato di seguito:

- Fit1: considerata Text pressoché costante, si è considerato $\Delta T = T_{int} - T_{int}(t=0)$
- Fit2: considerata Text pressoché costante, si è considerato $\Delta T = T_{int} - T_{ext}(t=0)$
- Fit3: si è preso $\Delta T = T_{int} - T_{int}$ per ogni istante di tempo.

Il valore di H è stato, inoltre, calcolato una volta considerando e un'altra non considerando la costante termica di riscaldamento della sorgente stessa. I due valori sono indicati rispettivamente con H_s e H.

Per la procedura di *fit* si è utilizzata la singola esponenziale, in quanto dalle figure dei dati acquisiti (*figure C - 1 e C - 2*) risulta chiaro che non vi è netta distinzione tra le due esponenziali. Questa assunzione è inoltre ragionevole in quanto:

$$C_{muri}/C_{aria} \approx 9 \text{ (per il caso a singola parete) (2cm)}$$

$$C_{muri}/C_{aria} \approx 15 \text{ (per il caso a doppia parete) (4 cm)}$$

Si riassumono, pertanto, in *tabella C - 1* i risultati ottenuti con il test sul box a parete singola:

Test box con parete singola, Potenza P=18,4W e $\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int max} = 3.1\%$		
H/ Hs (Fit1)	1,8	1,84
H/ Hs (Fit2)	1,58	1,61
H/ Hs (Fit3)	1,46	1,49

Tabella C - 1. Risultati dei fit ottenuti con il rilievo della temperatura nel box in polistirene con parete singola (2cm)

In questo test il sistema di riscaldamento è una resistenza elettrica di valore noto e la tensione di alimentazione è stata impostata per fornire una potenza termica di 18.9 W.

Il valore teorico di H per la singola parete è $H_{Teo}=1.7 \text{ kWh/m}^2$. Dai valori misurati si nota che le correzioni fatte con la temperatura esterna conducono a valori più piccoli. È ragionevole pensare che tali correzioni non siano corrette, in quanto è evidente dal grafico in figura C - 2 dei dati acquisiti che inizialmente la temperatura esterna è più bassa di quella interna. Nella relazione esponenziale ci si aspetta che all'istante iniziale le due temperature siano uguali, quindi questa differenza produce uno *shift* verso il basso dell'esponenziale, con conseguente valore inferiore di H.

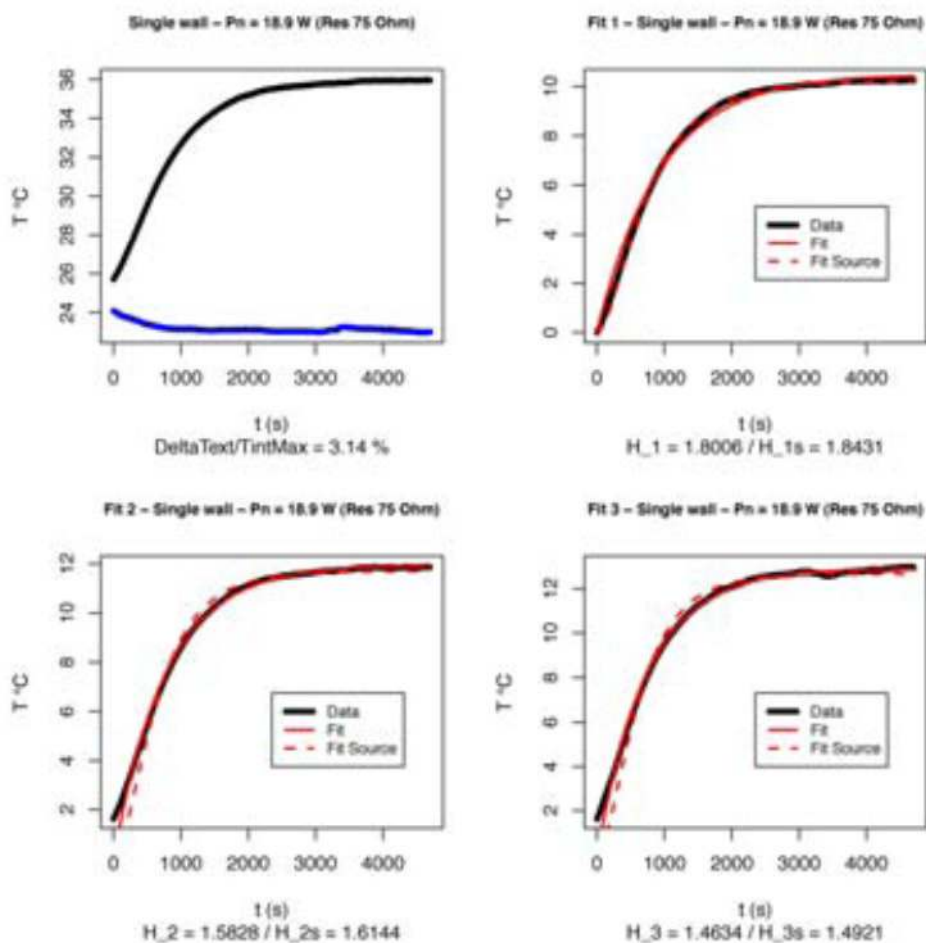


Figura C - 1. Grafici dei test svolti sul box in polistirene (modello A), all'interno del laboratorio, presso il Dipartimento di Fisica. Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne - nero - e la media delle temperature esterne - blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del Fit1 (alto destra), Fit2 (basso sinistra) e Fit3 (basso destra) testati sul modello con parete singola e potenza fornita di 19,8 W.

Si riassumono in tabella C-2 i risultati ottenuti con il test sul box a parete doppia, che ha una $H_{te0} = 0.85$ kWh/m:

Test box con parete doppia, $H_{te0} = 0.85$				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	$P_n = 18,9 \text{ W}$	$P_n = 40 \text{ W}$	$P_n = 15 \text{ W}_{naked}$	$P_n = 15 \text{ W}_{cover}$
(W/K)	$\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int max} = 0.48\%$	$\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int max} = 2\%$	$\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int max} = 2\%$	$\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int max} = 0.48\%$
H/ Hs (Fit1)	0,92/0,93	0,92/0,92	0,93/0,93	0,96/0,96
H/ Hs (Fit2)	0,86/0,87	0,92/0,93	0,93/0,93	0,91/0,91
H/ Hs (Fit3)	0,86/0,87	0,91/0,91	0,93/0,93	0,91/0,91

Tabella C - 2. Risultati delle acquisizioni sul box in polistirene.

Nei quattro test riassunti nella precedente tabella si sono usati come sorgenti di calore:

- una resistenza alimentata per fornire 18.9 W;
- una lampada ad incandescenza da 40 W;
- una lampada ad incandescenza da 15 W senza nessuna copertura (*naked*);
- la stessa lampada da 15 W ricoperta con uno strato di stagnola per eliminare l'irraggiamento nel visibile diretto sulle sonde e sulle pareti (*cover*).

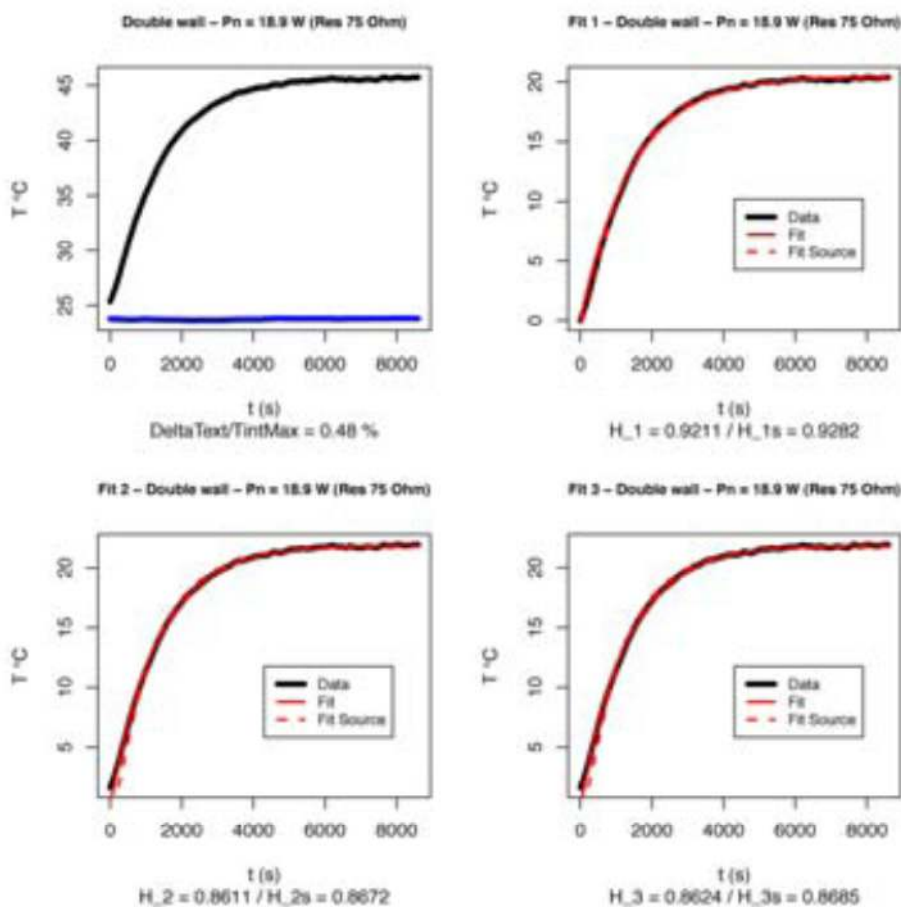


Figura C - 2. Grafici del test 1 svolto sul box in polistirene (modello A). Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne – nero – e la media delle temperature esterne – blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del Fit1 (alto destra), Fit2 (basso sinistra) e Fit3 (basso destra) testati sul modello con parete doppia e potenza fornita di 19,8 W.

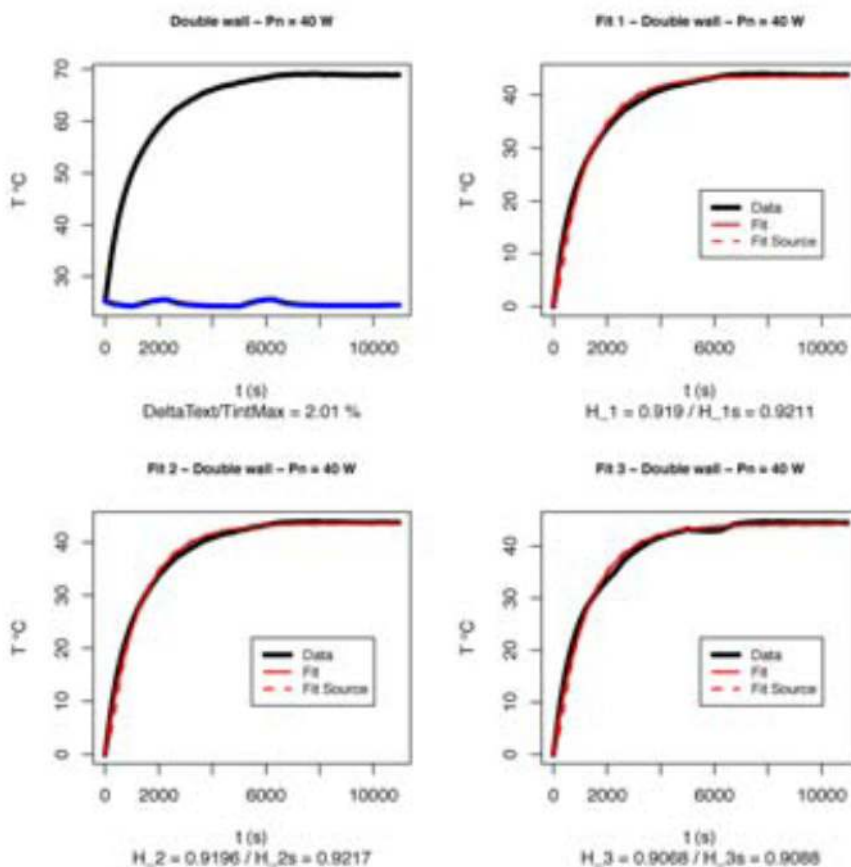


Figura C - 3. Grafici rispettivi al test 2 svolto sul box in polistirene (modello A). Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne – nero – e la media delle temperature esterne – blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del Fit1 (alto destra), Fit2 (basso sinistra) e Fit3 (basso destra) testati sul modello con parete doppia e potenza fornita di 40 W.

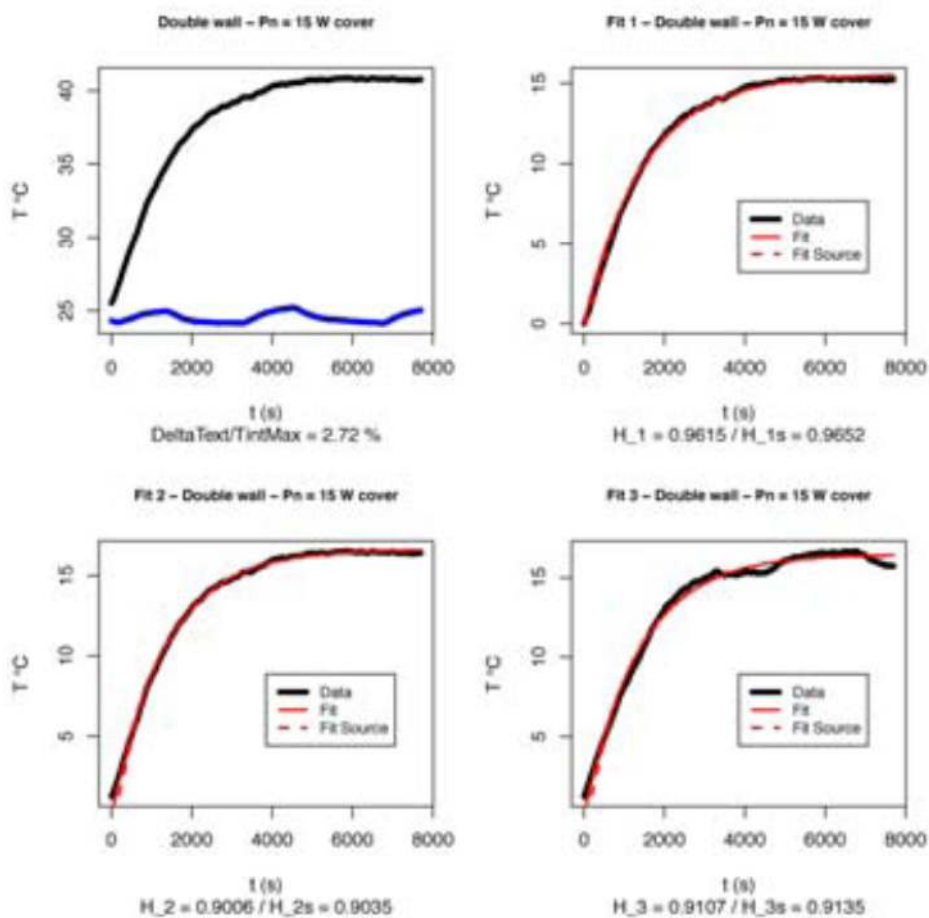


Figura C - 4. Grafici rispettivi al test 3 svolto sul box in polistirene (modello A). Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne – nero – e la media delle temperature esterne – blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del Fit1 (alto destra), Fit2 (basso sinistra) e Fit3 (basso destra) testati sul modello con parete doppia e potenza fornita di 40 W.(cover).

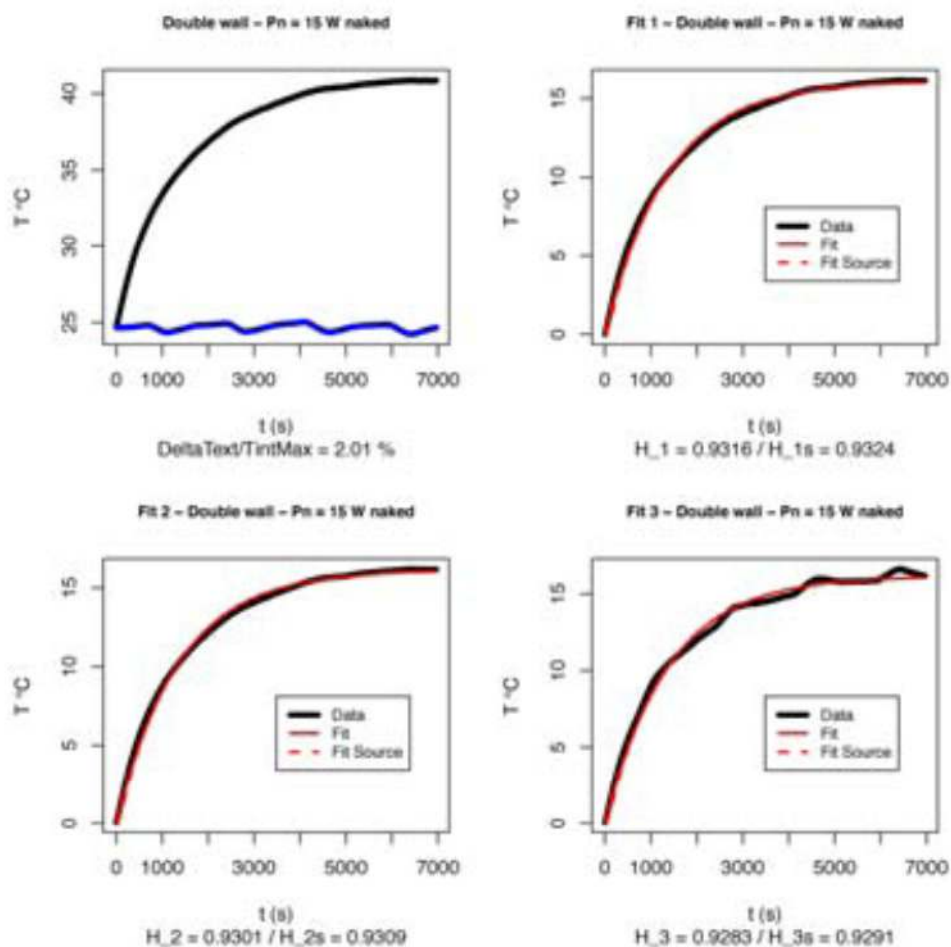


Figura C - 5. Grafici rispettivi al test 4 svolto sul box in polistirene (modello A). Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne – nero – e la media delle temperature esterne – blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del Fit1 (alto destra), Fit2 (basso sinistra) e Fit3 (basso destra) testati sul modello con parete doppia e potenza fornita di 15 W (*naked*).

Considerazioni

1. In generale il valore di H (coefficiente globale di scambio termico) misurato nei test su box con doppia parete è circa la metà di quello misurato con singola parete.
2. Si nota che nei test 1 e 4 H -fit1 è un po' diverso da H -fit2 e 3, mentre nei test 2 e 3 questa differenza è trascurabile. Questo si spiega con il fatto che nei test 1 e 4 i valori iniziali di temperatura interna e esterna non sono uguali e che la temperatura esterna rimane abbastanza costante, e comunque con fluttuazioni attorno ad un valor medio inferiore della temperatura interna iniziale. Nei test 2 e 3 invece la temperatura

interna e esterna iniziali sono uguali e la temperatura esterna durante il test fluttua di pochi punti percentuale attorno ad un valore medio. In effetti, questi test sono stati eseguiti in laboratorio con temperatura esterna controllata.

3. Si osserva che non ci sono grandi differenze fra i test 3 e 4, a conferma del fatto che la potenza irradiata nel visibile non influenza molto le misure.

4. Le correzioni apportate per tenere in considerazione la costante termica della sorgente, quindi il transitorio della sorgente stessa, si ripercuotono in misura molto ridotta sul test 1 e hanno influenza trascurabile nei test 2, 3 e 4, in quanto la resistenza impiega molto più tempo per raggiungere la temperatura di funzionamento di equilibrio rispetto al tempo impiegato da una lampada ad incandescenza.

C - 3. Curva di riscaldamento – Modello B

Uno dei test più significativi svolti sulla casetta è stato quello effettuato in data 12 Dicembre 2011, il quale ha avuto un tempo abbastanza lungo per permettere di vedere il comportamento a doppia esponenziale, come suggerito dal rapporto:

$$C_{muri}/C_{aria} \approx 10^3$$

L'acquisizione della curva di riscaldamento ha avuto una durata di circa 8 ore. Il *fit* con una sola esponenziale non produce una funzione che descriva bene i dati sperimentali. Questa osservazione è una seconda indicazione del fatto che per la casetta il modello ad una sola esponenziale non rappresenta una buona descrizione.

Pertanto, si è eseguito il *fit* in tre configurazioni diverse:

- fit di $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$ per ogni istante di tempo usando le prime 2 ore. Non sono state usate le 8 ore perché la variazione della temperatura esterna modifica a tal punto i dati misurati che non è possibile ottenere un *fit* preciso;
- fit di $\Delta T = T_{int} - T_{ext}(t=0)$ usando le prime 2 ore;
- fit $\Delta T = T_{int} - T_{ext}(t=0)$ usando tutte le 8 ore.

Si riportano in tabella C- 3 i risultati ottenuti.

Test casetta, $H_{teo} = 37$, Potenza $P=250$ W e $\Delta T_{ext}/ \Delta T_{int\ max} = 3.75\%$			
	(1) - 2 ore	(2) - 2 ore	(3) - 8 ore
(W/K)	$\Delta T = \Delta T_{int} - \Delta T_{ext}$	$\Delta T = \Delta T_{int} - \Delta T_{ext}(0)$	$\Delta T = \Delta T_{int} - \Delta T_{ext}(0)$
H	33,9	25,4	18,4

Tabella C - 3. Risultati dei fit ottenuti con il test sulla curva di riscaldamento condotto sul modello B.

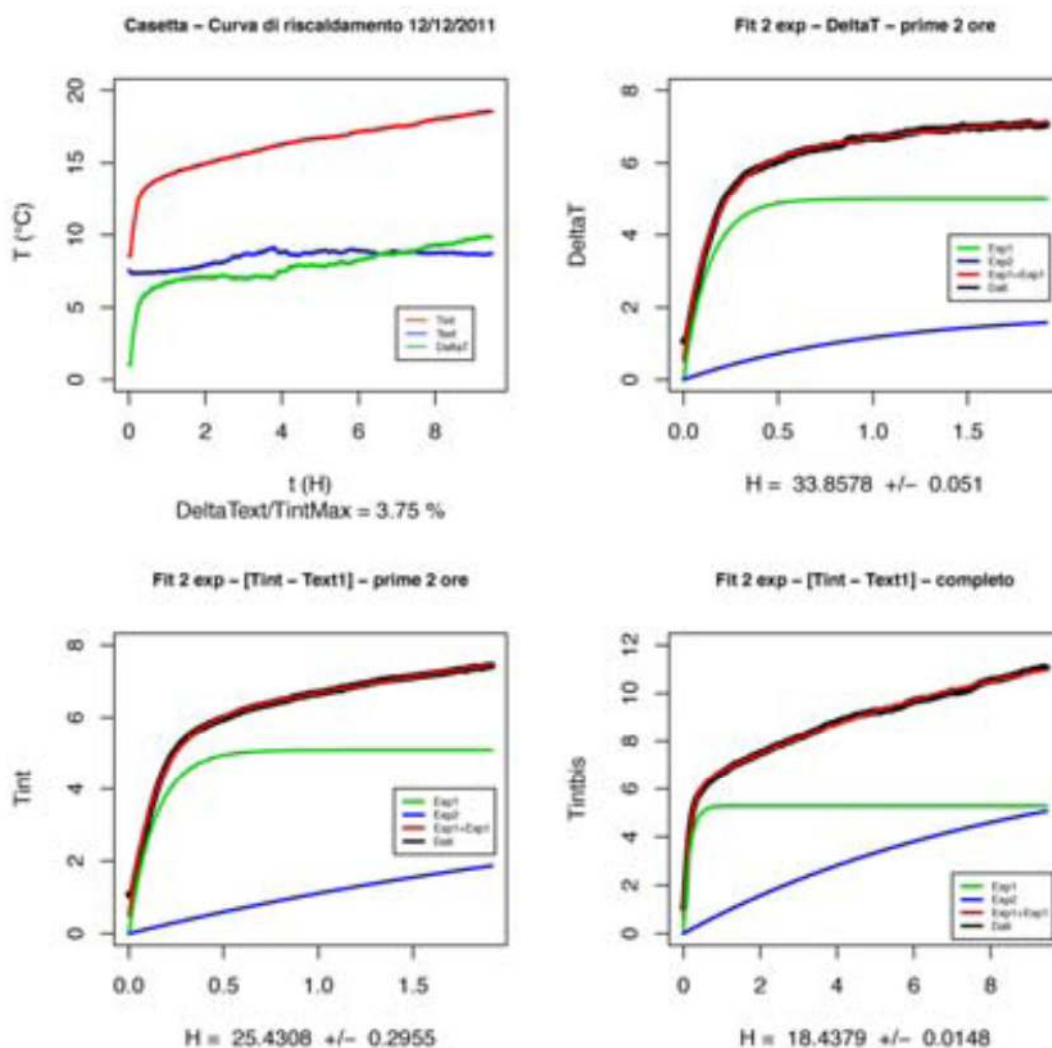


Figura C - 6. Nell'immagine si vedono i grafici rispettivi al test *curva di riscaldamento* svolto sulla casetta (modello B, nel giardino del Dipartimento di Architettura). Il primo grafico (alto sinistra) rappresenta il risultato del rilievo non rielaborato (temperature acquisite, media delle temperature interne – nero – e la media delle temperature esterne – blu), gli altri grafici rappresentano il risultato del test (1) (alto destra), test (2) (basso sinistra) e test (3) (basso destra) testati sulla casetta con $P = 250 \text{ W}$.

Considerazioni

1. Nel caso della casetta non sono state apportate correzioni per il transitorio di riscaldamento della sorgente, in quanto molto più veloce del transitorio del sistema.
2. Le differenze fra i tre valori di H sono notevoli.

3. La variazione della temperatura esterna durante tutto il test è variata del 3.75%, contro una variazione massima del 2% vista nei test sul box in polistirene.
4. La differenza fra i valori calcolati usando le prime 2 ore sono da attribuire al metodo di sottrazione della temperatura esterna.
5. Tra il secondo e terzo risultato cambia solo l'intervallo di tempo considerato e questo mostra come la conoscenza sperimentale della curva di riscaldamento influenzi il risultato di H.

Conclusioni Curva di riscaldamento

Dai test eseguiti con la curva di riscaldamento risulta evidente che per ottenere una misura di coefficiente globale di scambio termico attendibile è necessario sottrarre adeguatamente la temperatura esterna a quella interna. Si è visto, infatti, che i test sul box in polistirene eseguiti in ambiente controllato conducono a risultati attendibili, ma in ogni caso fortemente dipendenti dalla sottrazione della temperatura esterna. Nei test sulla casetta l'impossibilità di sottrarre adeguatamente la temperatura esterna non conduce a risultati attendibili. Quest'ultima situazione è sicuramente più simile a quella che si incontrerebbe in un test su un edificio reale.

In conclusione il test di curva di riscaldamento può dare risultati attendibili solo in condizioni esterne particolarmente stabili.

C - 4. Tecnica di misura con ΔT costante – modello B

La tecnica di misura di H_{gl} con ΔT costante consiste nel controllare la sorgente di calore (On/Off) al fine di mantenere la differenza di temperatura tra interno ed esterno costante.

Mantenere la ΔT costante permette di ipotizzare di essere in uno stato di "quasi equilibrio termico", in quanto non vi sono variazioni importanti di ΔT . Acquisendo, quindi, una notevole quantità di dati è possibile calcolare H usando la relazione dell'equilibrio:

$$\Delta T = P \cdot R = P / H \Rightarrow H = P / \Delta T \quad (6)$$

Questo test è stato eseguito solo sul modello B in modo da sfruttare le basse variazioni della temperatura esterna nel periodo invernale di svolgimento dei test.

Il calcolo di H_{gl} è stato eseguito in due modi diversi di analisi dei dati, che si illustrano di seguito.

Nel primo caso "On/Off" è stato considerato per ogni acquisizione lo stato del riscaldamento. Le

acquisizioni sono uniformi ogni secondo, quindi il *DutyCycle*¹ è stato calcolato con la seguente relazione:

$$\text{Duty Cycle} = N_{\text{acq ON}} / N_{\text{acq}}$$

Dove

N_{acq} = rappresenta il numero di acquisizioni.

Si considera il rapporto fra il numero di acquisizioni in cui la sorgente era accesa (ON) e il numero totale di acquisizioni. Si può fare questo rapporto in quanto le acquisizioni sono temporalmente omogenee. Tali acquisizioni sono una al secondo.

Pertanto:

$$H = (P_N * \text{DutyCycle}) / \Delta T_{\text{mean}}$$

Nel secondo caso “*Ramp*” sono state analizzate le singole rampe riscaldamento/raffreddamento e per ognuna di esse è stato calcolato il *DutyCycle* come rapporto tra il tempo di salita e il tempo totale. Invece la ΔT media è stata calcolata come media dei singoli valori medi di ΔT calcolati per ciascuna rampa.

$$\text{DutyCycle} = t_{\text{risc}} / t_{\text{raff}}$$

Dove

t_{risc} = tempo di riscaldamento

t_{raff} = tempo di raffreddamento

$$H = (P_N * \text{DutyCycle}) / \Delta T_{\text{ramp mean}}$$

Di seguito sono riportati i grafici corrispondenti ai test appena descritti.

¹ In elettronica, in presenza di un segnale sotto forma di onda rettangolare, si definisce *ciclo di lavoro* o *ciclo di lavoro utile* (a volte detto *duty cycle D*, dall'inglese) il rapporto tra la durata del segnale "alto" e il periodo totale del segnale, e serve a esprimere per quanta porzione di periodo il segnale è a livello alto (intendendo con alto il livello "attivo"). In questo caso si intende con *Dutycycle* il periodo di funzionamento dell'impianto di riscaldamento, dal momento che per mantenere il ΔT costante esso si è acceso e spento continuamente durante il periodo di rilievo.

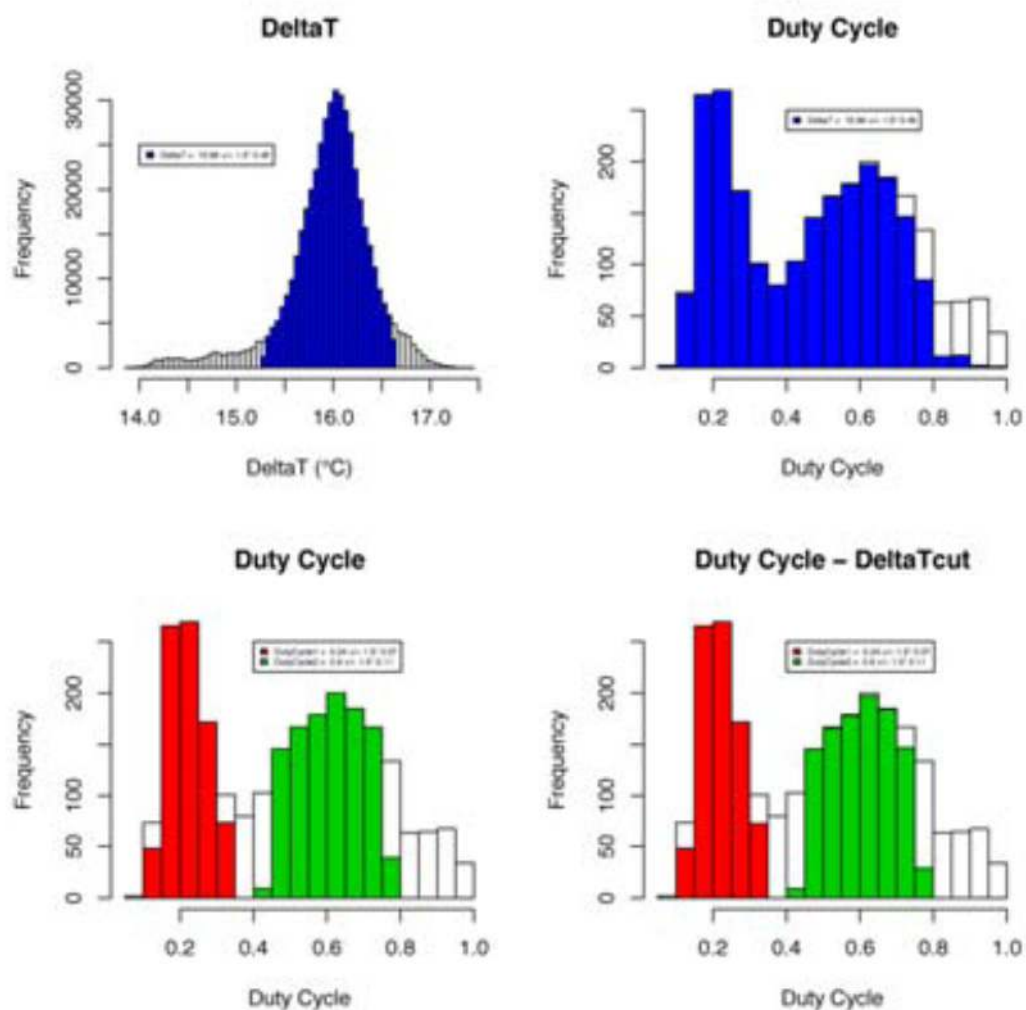


Figura C - 7. Nell'immagine si vedono i grafici corrispondenti alle distribuzioni di ΔT e dei Duty Cycle calcolati con il metodo *Ramp*. Da notare che il DutyCycle mostra due picchi.

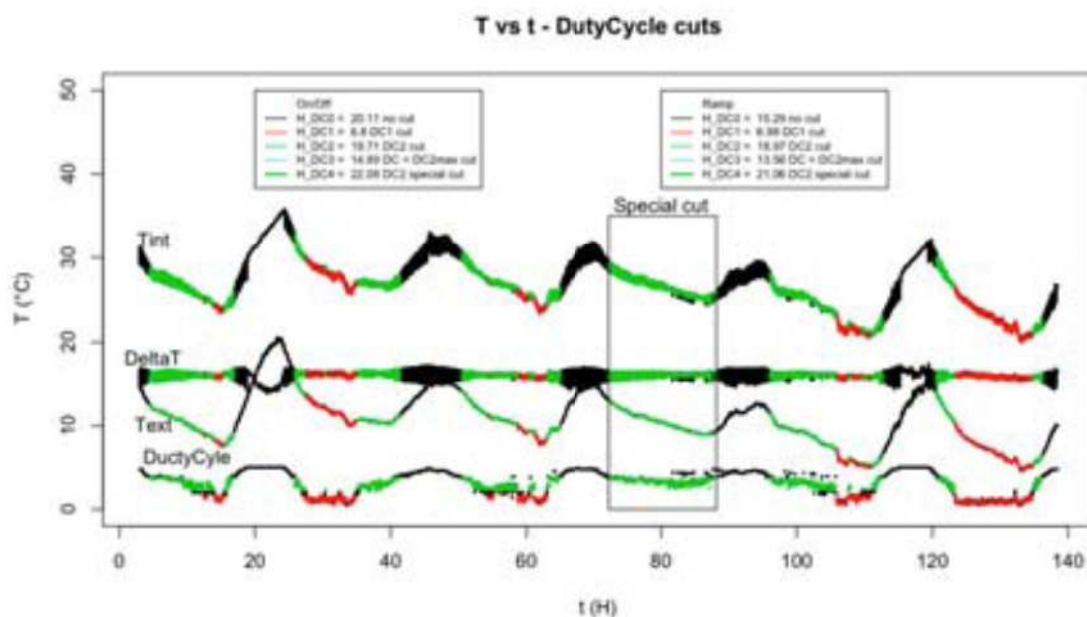


Figura C - 7. Nell'immagine si vedono i grafici corrispondenti al Temporale1. I coefficienti H sono stati calcolati considerando i singoli DutyCycle ristretti attorno al primo picco (rosso – cut1), al secondo picco (verde – cut2) e in un intervallo che comprende entrambi i picchi (cut3). Si è anche considerato un intervallo temporale continuo per confronto (cut4, DC2 special). E' stato calcolato H anche senza applicare tagli (cut0).

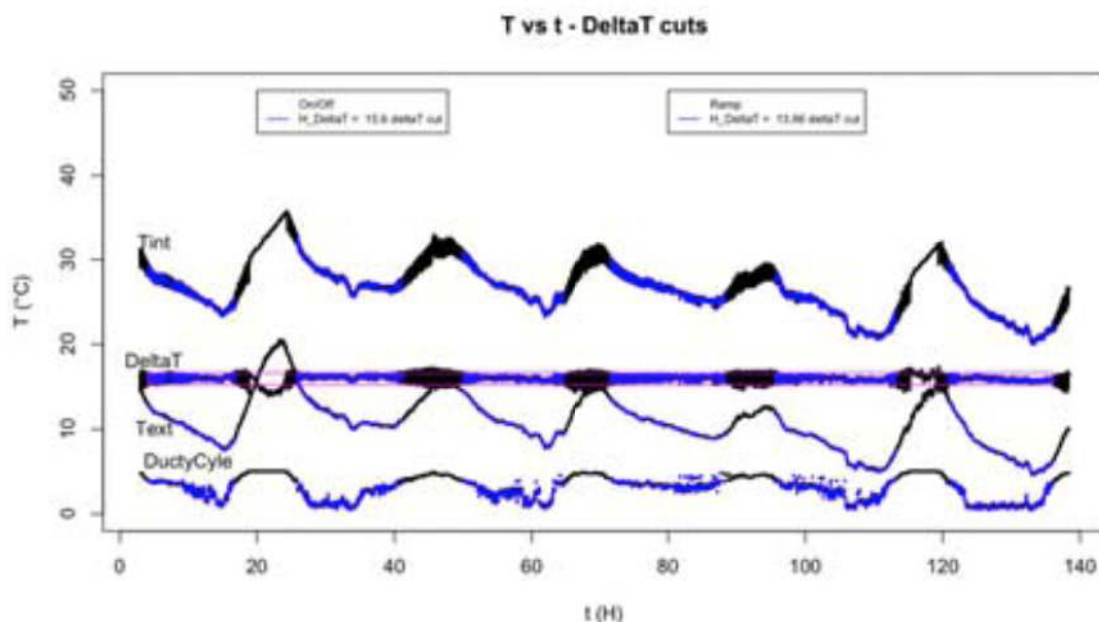


Figura C - 8. Nell'immagine si vedono i grafici corrispondenti al Temporale2. Anziché usare come tagli i valori di Duty Cycle si è considerata la ΔT entro un intervallo ristretto sia nel metodo On/Off che nel metodo Ramp. In quest'ultimo si sono considerate solo le rampe complete con Tmin e Tmax comprese nell'intervallo considerato.

Considerazioni

Si nota, anzitutto, la presenza di due picchi nel *DutyCycle* che fa pensare ad una dipendenza del test dalle variazioni e dalla rapidità di variazioni della temperatura esterna. Si vede, infatti, che nel periodo identificato da *Special cut* il *DutyCycle* è ristretto solo al secondo picco e si osserva una variazione lenta della temperatura esterna rispetto agli altri giorni.

Il valore di H_{gl} ottenuto con il solo primo picco di *DutyCycle* è decisamente troppo basso per essere un valore corretto, sembra quindi che nelle condizioni che permettono un *DutyCycle* così basso non sia possibile calcolare H_{gl} .

I valori di H_{gl} ottenuti considerando tutti i *DutyCycle* del primo e secondo picco risultano abbassati rispetto a quelli del secondo picco, in quanto il *DutyCycle* inferiore abbassa il valore di H_{gl} .

Risultano, invece, abbastanza confrontabili i valori ottenuti con solo il secondo picco di *DutyCycle* sia sull'intero periodo che sul periodo *Special cut*.

I valori ottenuti tagliando sulle temperature delle rampe risultano abbassati, probabilmente per lo stesso motivo evidenziato sopra. Infatti, tagliando solo sulle temperature si includono i due picchi di *DutyCycle*.

Si nota, inoltre, che i valori ottenuti con il metodo On/Off e quelli con il metodo Ramp sono fra di loro confrontabili. Non si sono tenuti in considerazione eventuali apporti dovuti all'irraggiamento solare.

C - 5. Curva di inseguimento – modello B (valutazione degli errori)

Il sistema di misura "curva di inseguimento" testato ha fornito risultati interessanti perché permette di raggiungere, qualsiasi tipo di analisi si faccia, un risultato di coefficiente globale di scambio termico confrontabile con il valore teorico. Nonostante la bontà del risultato, tuttavia, la misura comprende un errore di analisi della misura stessa. Questo errore è composto da due contributi:

- un contributo *statistico* dovuto alle piccole oscillazioni delle temperature;
- un contributo *sistematico* derivante dalla sottrazione fra curve "periodiche" con ampiezze diverse.

In particolare è necessario conoscere e risolvere il contributo sistematico. In figura C-8 è rappresentata una schematizzazione della curva delle temperature interne (rossa) ed esterne rilevate. Come si vede, la sinusoidale che descrive le temperature esterne ha un'ampiezza maggiore dalla curva delle temperature interne. Questa differenza dipende da un parametro determinato dalle capacità termiche coinvolte dal rilievo (capacità termica dell'involucro, dell'aria, ecc...) e dal coefficiente globale di scambio termico. Nel secondo metodo di analisi sperimentato si sono sottratte le temperature esterne a quelle interne corrispondenti (in figura: $T_{1int} - T_{1ext}$, $T_{2int} - T_{2ext}$, ecc...): tale differenza varia punto per punto proprio perché le due curve hanno un'ampiezza diversa. Questo implica che il coefficiente globale di scambio termico calcolato punto per punto non è sempre uguale. L'errore si ripartisce nel momento in cui si fa la media di tutti i coefficienti di scambio termico calcolati. In ogni caso, nel proseguimento della ricerca sarà studiato un metodo per la risoluzione di questo problema.

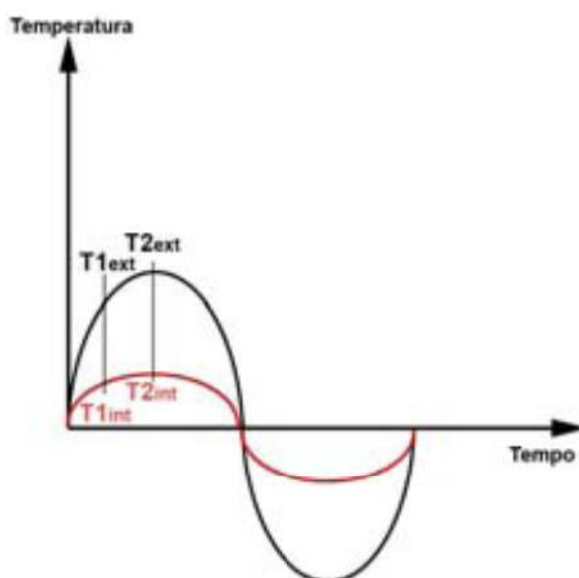


Figura C-8. Grafico schematico delle curve di temperature rilevate. La sinusoidale rossa rappresenta la curva delle temperature interne mentre quella nera le temperature esterne.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento lo devo innanzitutto al prof. Pietromaria Davoli che mi accompagna nell'avventura universitaria ormai da parecchi anni. Lo ringrazio per essere stato per tutto questo tempo una guida e di averlo fatto sempre con grande partecipazione umana.

Un pensiero speciale di gratitudine va ai ricercatori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara che hanno supportato, con grande disponibilità, la mia sperimentazione. In particolare ringrazio il Prof. Mirco Andreotti che ha lavorato al mio fianco intensamente mostrando sempre una grande professionalità scientifica, instancabilmente accompagnata da grande passione ed entusiasmo.

Alla fine di questo percorso, che continua sin dal periodo della tesi di laurea, voglio ringraziare anche il prof. Giacomo Bizzarri che si è dimostrato ancora una volta ben disposto a credere in me e alle mie idee.

Questo periodo di scuola di dottorato ha rappresentato una fase importante della mia vita, legata a momenti intensi di scambio culturale, crescita umana e professionale e anche molta amicizia. Un grazie speciale è riservato a Vittorino Belpoliti e Paola Boarin che hanno rappresentato in questi anni un punto di riferimento per la condivisione di tutti questi momenti di lavoro ma anche di svago e divertimento.

A fianco a loro voglio ricordare i compagni di dottorato, Veronica, Pietro e Gianluca che ringrazio per aver dato vita a uno straordinario XXV ciclo.

Niente di quello che ho fatto e che faccio sarebbe altrettanto significativo se al mio fianco non avessi tre persone indispensabili e straordinariamente speciali: semplicemente grazie a Puni, Olly e Tone.

Concludo con un ultimo pensiero riservato a chi mi ha rubato il computer e il disco di backup che contenevano il materiale della tesi oltre a molti ricordi preziosi...in un qualche modo gli devo essere grata per avermi permesso di dimostrare a me stessa, prima che agli altri che, con grinta e determinazione, rimboccandosi le maniche si arriva sempre alla meta.