

The historic architecture can have a significant role in the achievement of the European targets about energy efficiency in the construction sector, but this purpose has to be compatible with the conservation of the built heritage and its cultural value. Therefore, it is necessary to consider the specific characters of the historic architecture and its local dimension.

This thesis examines the energy performance of historic buildings and its potential improvement by focusing on the architectural heritage of Palermo, which is a significant case study for the Mediterranean area. The research is conducted both at the urban scale and at the level of envelope components, following for Palermo a methodology adaptable to other contexts. Through a building categorisation of the town historic centre, the thermal simulation (WUFI Plus) of representative buildings and the thermophysical characterisation of historic stone walls and calcarenite specimens, this thesis contributes to the development of a knowledge framework, which is the necessary basis of strategies and criteria for a compatible energy improvement of the historic architecture.



Enrico Genova (1988), engineer and architect, graduated *magna cum laude* in 2012 (*Laurea specialistica in Ingegneria edile - Architettura*) at the University of Palermo. Some of his works are published in conference proceedings, books and magazines.

XXVI

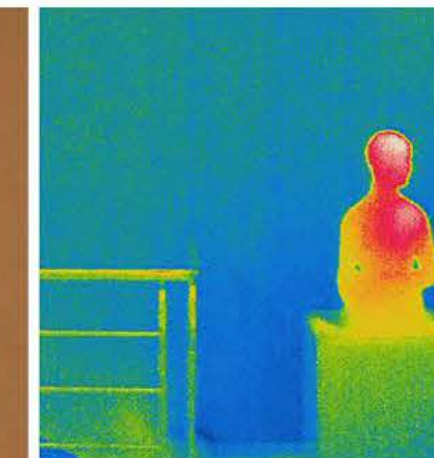
ENRICO GENOVA

IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO NEL RECUPERO DEGLI EDIFICI STORICI
Applicazione al patrimonio architettonico palermitano

Dottorato di Ricerca in Architettura
Coordinatore Prof. Emanuele Palazzotto
Indirizzo *Recupero dei Contesti Antichi e Processi Innovativi nell'Architettura XXVI Ciclo*
Referente Prof. Giuseppe De Giovanni

IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO NEL RECUPERO DEGLI EDIFICI STORICI

Applicazione al patrimonio architettonico palermitano



ENRICO GENOVA

AREA 08 - SSD ICAR/10 - Architettura Tecnica

TUTOR: Prof. Giovanni Fatta (Università degli Studi di Palermo)

CO-TUTOR: Prof. Tor Broström (Uppsala Universitet)

Dr. Ralf Kilian (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Prof. Calogero Vinci (Università degli Studi di Palermo)

In copertina: chiostro monumentale di Sant'Anna alla Misericordia a Palermo
Sul risvolto: particolari di misurazioni di conduttanza termica e indagini termografiche al complesso di Sant'Anna alla Misericordia
In quarta: campioni di calcarenite provenienti da edifici storici palermitani

Università degli Studi di Palermo
Dipartimento di Architettura
Dottorato di Ricerca in Architettura
Coordinatore Prof. Emanuele Palazzotto
Indirizzo *Recupero dei Contesti Antichi e Processi Innovativi nell'Architettura XXVI* Ciclo

Referente Prof. Giuseppe De Giovanni

Area 08 - Ingegneria civile e Architettura
SSD ICAR/10 - Architettura Tecnica

TUTOR

Prof. Giovanni Fatta (Università degli Studi di Palermo)

CO-TUTOR

Prof. Tor Broström (Uppsala Universitet)

Dr. Ralf Kilian (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Prof. Calogero Vinci (Università degli Studi di Palermo)

ENRICO GENOVA

**IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO NEL RECUPERO
DEGLI EDIFICI STORICI**
Applicazione al patrimonio architettonico palermitano

2013-2015

Qualsiasi riproduzione totale o parziale di questa tesi è consentita, a condizione che la fonte di citazione sia divulgata.

Any full or partial reproduction of this thesis is allowed provided that the citation source is disclosed.

INDICE

IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO NEL RECUPERO DEGLI EDIFICI STORICI Applicazione al patrimonio architettonico palermitano

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1. La sostenibilità nel campo dell'architettura storica	15
1.1 L'edilizia nella prospettiva di uno sviluppo sostenibile	18
1.2 Norme e strumenti per la sostenibilità nel settore delle costruzioni	20
1.3 Cenni alla legislazione sulle prestazioni energetiche degli edifici	24
1.4 Il concetto di sostenibilità fra conservazione e restauro	26
1.5 Opportunità di miglioramento energetico ed esigenze di tutela	28
Note	35
Bibliografia	37
CAPITOLO 2. La qualità energetica e ambientale dell'architettura storica: percorsi di ricerca	39
2.1 Linee guida e sistemi di valutazione della sostenibilità	42
2.2 La valutazione del ciclo di vita	44
2.3 Indagini conoscitive e modellazioni	45
2.4 Interventi e criteri di scelta	46
2.5 Scala di ricerca: da singole architetture a comparti edilizi	49
Note	49
Bibliografia	50
CAPITOLO 3. La qualità energetica e ambientale dell'architettura storica: caratteristiche, esigenze, prestazioni	53
3.1 Cenni termofisici sui materiali della costruzione storica	56
3.2 Grandezze termiche per le chiusure opache	61
3.2.1 La trasmittanza termica per i componenti dell'edificio storico	61
3.2.2 La misura in opera della trasmittanza termica	66

3.2.3 Parametri termici dinamici	69
3.3 Gli infissi storici fra trasmissione, ombreggiamento e ventilazione	72
3.4 Connessioni e permeabilità all'aria	77
3.5 L'edificio e il suo contesto	80
3.6 Diagnostica per la conservazione e la qualità ambientale interna	82
Note	83
Bibliografia	84
CAPITOLO 4. Contributo alla caratterizzazione termofisica delle murature storiche palermitane	87
4.1 La questione della trasmittanza termica per le murature storiche	90
4.2 Dati termofisici per le murature storiche in calcarenite	92
4.3 Caratteristiche termofisiche di tre campioni di calcarenite conchiliare	99
4.3.1 Massa volumica e porosità	101
4.3.2 Conducibilità termica	102
4.3.3 Caratteristiche igrometriche	105
4.4 Misure in opera di conduttanza termica: le murature del complesso monumentale di Sant'Anna alla Misericordia	116
4.4.1 Obiettivi e metodo	118
4.4.2 Procedimento di misura	119
4.4.3 Criteri di calcolo	126
4.4.4 Risultati	127
Note	136
Bibliografia	137
CAPITOLO 5. Tecniche d'intervento per il miglioramento energetico	139
5.1 Il miglioramento prestazionale delle murature	142
5.1.1 L'isolamento delle murature	143
5.1.2 Sistemi "a cappotto" per l'edilizia storica	145
5.1.3 Intonaci termoisolanti	148
5.2 Interventi sugli orizzontamenti	149
5.2.1 Isolanti termici in copertura	150
5.2.2 Coperture riflettenti	152
5.3 Miglioramento prestazionale degli infissi	155
5.4 Le connessioni: ponti termici e permeabilità all'aria	159
5.5 Miglioramenti impiantistici	161
Note	169
Bibliografia	170

CAPITOLO 6. Proposta di descrizione dell'architettura storica di Palermo per categorie edilizie	175
6.1 La tutela dell'architettura storica palermitana	178
6.2 L'approccio tipologico allo studio delle prestazioni energetiche degli edifici storici	184
6.3 Metodo di categorizzazione proposto nel progetto europeo EFFESUS	189
6.4 Categorie edilizie per il centro storico di Palermo: applicazione al mandamento Castellammare	191
6.4.1 Scelta e raccolta dei dati	191
6.4.2 Proposta di categorie edilizie	201
Note	209
Bibliografia	210
CAPITOLO 7. Ipotesi di miglioramento energetico per edifici rappresentativi dell'architettura storica di Palermo	213
7.1 Scelta di architetture rappresentative di tre categorie edilizie	216
7.2 Modellazione degli edifici analizzati	219
7.3 Dati e ipotesi per le simulazioni	229
7.3.1 Dati climatici	229
7.3.2 Materiali e stratigrafie per i componenti opachi	231
7.3.3 Infissi e dispositivi di ombreggiamento	236
7.3.4 Ventilazione naturale	237
7.3.5 Modalità di occupazione degli edifici e utilizzo degli impianti	239
7.4 Configurazioni simulate	241
7.5 Risultati	243
7.5.1 Prestazioni attuali e miglioramenti di semplice applicazione	243
7.5.2 Isolamento delle murature	245
7.5.3 Mitigazione del surriscaldamento estivo	251
Note	252
Bibliografia	254
CONCLUSIONI	255

INTRODUZIONE _ INTRODUCTION

L'architettura storica costituisce una parte rilevante del patrimonio edilizio europeo e può contribuire in modo significativo al conseguimento degli obiettivi comunitari di sviluppo sostenibile. Infatti al settore edile si attribuisce una quota consistente dei consumi energetici dell'Unione, mentre alla qualità ambientale degli spazi confinati sono strettamente connessi il benessere e la salute delle persone. Per raggiungere tali obiettivi, la proporzione limitata delle nuove costruzioni rispetto all'edificato esistente evidenzia la necessità d'intervenire su quest'ultimo. Per l'architettura storica, tuttavia, tale esigenza è condizionata fortemente da quella di conservarne il valore culturale.

Le recenti proposte di sistemi di valutazione della sostenibilità ambientale per gli interventi di recupero testimoniano un crescente interesse verso un ambito di cui l'efficienza energetica è un aspetto e molte questioni, quali l'impatto ambientale delle lavorazioni e la loro conseguenza sulla salute delle persone, influenzano la scelta dei materiali e delle tecniche da impiegare. Ridurre il divario prestazionale con gli edifici di nuova realizzazione, che in prospettiva è crescente, contribuisce all'utilizzo e quindi alla conservazione del patrimonio storico; tuttavia l'impatto delle azioni a tal fine necessarie e le

The historic architecture represents a considerable part of the European building stock and it may contribute to achieve the Community objectives of sustainable development. Indeed a growing part of the Union energy consumption is attributed to the building sector, while people's comfort and health are strictly linked to the indoor environmental quality. In order to reach these targets, the limited proportion of new buildings compared to the existing constructions stresses the need for interventions on the last ones. However, for what concerns historic architecture, such necessity is strongly influenced by the preservation of the building cultural value.

The recent proposals of several methods for assessing the environmental sustainability of restoration works prove a growing interest in a field which energy efficiency is only an aspect of, and many issues, such as environmental impact of processing and its consequence on health, can influence the choice of materials and techniques. Reducing the performance gap between historic and new buildings, which has now become a largely shared objective, contributes to the preservation of the architectural heritage. However, the impact of the actions necessary to achieve

incertezze sui loro possibili effetti di lungo termine stanno facendo emergere un intenso dibattito sulla necessità, compatibilità e reversibilità di tali interventi.

In questo contesto variegato, anche per l'architettura storica l'accrescimento dell'efficienza energetica attira un'attenzione particolare, sia per la grande influenza che ha sull'impatto ambientale delle costruzioni, sia per ragioni economiche non certo trascurabili. Per gli edifici privati la richiesta di prestazioni sempre più elevate è promossa da politiche locali e nazionali di incentivazione fiscale. Per le istituzioni pubbliche, che utilizzano un gran numero di edifici storici spesso a carattere monumentale, alla prospettiva di consistenti risparmi economici si aggiunge il ruolo esemplare che la direttiva 2012/27/UE attribuisce a questi enti nel perseguimento degli obiettivi comunitari di sostenibilità ambientale.

La normativa italiana sull'efficienza energetica degli edifici accoglie anch'essa la deroga che la direttiva 2010/31/UE propone per gli edifici storici e la applica alle costruzioni soggette al Codice dei Beni culturali e del Paesaggio. Questa impostazione evita un adeguamento acritico del costruito storico a prestazioni difficilmente raggiungibili se non a prezzo di profonde alterazioni. Tuttavia, se da un lato una parte consistente del patrimonio storico, soprattutto di edilizia minore, ne risulta esclusa, al contempo la deroga non è sufficiente a scongiurare interventi volti ad accrescere le prestazioni energetiche degli edifici storici senza la necessaria attenzione alla conservazione dei loro caratteri formali e materiali.

Nel campo del consolidamento statico e dell'accessibilità, da alcuni decenni si è consolidato per le costruzioni storiche un ap-

these aims and the uncertainty about their long-term effects are producing an intense debate on the necessity, compatibility and reversibility of these actions.

In this varied context, the improvement of energy efficiency appears to be particularly important, because of both its great influence on constructions' environmental impact and not negligible economic reasons. For private buildings, the demand of higher and higher performances is promoted by national and local tax incentive policies. For public institutions, which occupy a great number of historic buildings, often monuments, the perspective of significant savings is associated with the exemplary role attributed by the Directive 2012/27/EU to public entities in pursuing the European objectives of environmental sustainability.

Also Italian legislation on building energy efficiency accepts the derogation for listed buildings proposed by the Directive 2010/31/EU and apply it for constructions subjected to the national Code of Cultural Assets and Landscape. This approach prevents an uncritical adjustment of historic buildings to performances which would be hardly achieved without deep alterations. However, a considerable part of the historic architectural heritage, notably vernacular constructions, are excluded. Moreover, the derogation is not sufficient to prevent the improvement the energy performances of historic buildings without the necessary attention to the preservation of their formal features and materials.

In the field of structural strengthening and accessibility, for several decades it has been preferred to follow an approach

proccio che non mira ad adeguarle necessariamente ai requisiti normativi, ma a migliorarne le prestazioni nei limiti posti dalle esigenze della conservazione, limiti che dipendono anche dai caratteri specifici della singola architettura. Numerosi studi propongono oggi di applicare questo criterio anche all'accrescimento delle prestazioni energetiche e ambientali.

In quest'ottica, gli interventi più condizionati sono quelli sull'involucro. Essi si confrontano con i consistenti risparmi energetici che, anche attraverso la semplice sostituzione di alcuni componenti, sono conseguibili sugli impianti. Inoltre i primi meno di questi ultimi possono sfruttare le trasformazioni già prodotte sulla costruzione storica da passati interventi di adeguamento. Tuttavia, proprio come per gli impianti, molti interventi di miglioramento energetico dell'involucro possono essere integrati nelle pratiche attuali del recupero, o sono applicabili per via dello stato di degrado degli edifici, oppure ancora sono resi ammissibili da innovazioni che ne hanno risolto i problemi di compatibilità formale con l'architettura storica.

Nel quadro complessivo del recupero e della conservazione del patrimonio architettonico, è indispensabile il supporto culturale fornito dalla conoscenza dei caratteri materiali, costruttivi e formali che lo connotano. Ciò consente di delineare un quadro generale di criticità, potenzialità e soluzioni al quale guardare per indirizzare una progettazione commisurata alle peculiarità specifiche di ciascun edificio.

Analogamente, per la diffusione di pratiche compatibili di miglioramento energetico è opportuno indagare i caratteri ricorrenti del costruito storico che ne determinano il fab-

aiming to improve performances within the limits of conservation, which depend on the specific features of the single architectures, rather than strictly adjusting constructions to the legislation. Many studies suggest to apply this approach also to the attempt of increasing energy and environmental performances.

In this perspective, the operating measures most influenced by the conservation needs are the ones performed on the envelope. They are compared to the significant energy savings which can be achieved on services, also by means of the simple replacement of some components. Moreover, the envelope improvement can take less advantage from past adjustments than the enhancement of services. However, several measures to improve the energy performance of the envelope may be integrated in the current restoration practice, their application may be allowed by the level of building degradation, or they are made possible by innovations solving problems of aesthetic compatibility with historic architecture.

In the general context of restoration and conservation of the architectural heritage, the cultural support provided by the knowledge of its material, construction and aesthetic characteristics is essential. This provides a general overview of challenges, potentialities and solutions to look at in order to properly adapt the planning to the specific features of each building.

Similarly, for the spread of compatible energy improvement practices, it is appropriate to investigate historic buildings' recurrent features. Indeed, these last ones determine the energy demand of historic

bisogno, influenzano l'applicabilità e l'efficacia delle soluzioni disponibili e possono quindi indicare possibili percorsi d'innovazione. A tal fine bisogna necessariamente far riferimento alla dimensione locale del patrimonio architettonico e alle sue peculiarità.

La ricerca che si espone indaga le prestazioni energetiche dell'architettura storica e le strategie potenzialmente attuabili per un suo miglioramento compatibile attraverso modelli condivisi, verificati sul contesto storico di Palermo. Essa si concentra sugli edifici realizzati, entro gli inizi del XX secolo, adoperando le tecniche e i materiali propri della tradizione costruttiva cittadina. Tale patrimonio, per la sua estensione e varietà, può considerarsi un utile riferimento per una parte consistente dell'architettura siciliana e un caso di studio significativo per il contesto mediterraneo, per il quale le questioni relative alle prestazioni energetiche, nel panorama attuale della ricerca, risultano meno approfondite rispetto alle aree nelle quali prevale il fabbisogno di energia per il riscaldamento.

Questo studio si propone come un contributo alla costruzione di un quadro generale di conoscenze sul comportamento termico degli edifici storici, sull'apporto che i suoi caratteri costruttivi e distributivi ricorrenti possono dare al miglioramento di tali prestazioni, sui limiti e le potenzialità che discendono dai principi di conservazione e dai vigenti vincoli di tutela.

Per conseguire tale obiettivo, si adopera un metodo di analisi che coinvolge sia la scala dei componenti tecnici sia quella dell'edificio. Rivolta principalmente all'involucro edilizio, la ricerca esamina, dal punto di vista delle prestazioni energetiche, le tecniche e i materiali della tradizione costruttiva paler-

constructions, they influence the applicability and effectiveness of available solutions, and they may suggest possible innovation paths. For this purpose, it is necessary to look at the local dimension of the architectural heritage and its features.

This study investigates the energy performances of the architectural heritage of Palermo and the strategies which could be applied for their compatible improvement. It is focused on constructions built within the beginning of the XX century, using the materials and techniques peculiar to the town building tradition. Such a heritage may be considered a useful reference for a considerable part of the Sicilian architecture, because of its extension and variety. It may also represent a significant example for the Mediterranean context, where the topic of energy performances is not as studied as in the areas where energy demand for heating prevails.

The aim of this study is to contribute to the creation of a general knowledge framework concerning the thermal behaviour of Palermo's historic architecture and to clarify the contribution which its construction and distribution recurrent features may provide to the improvement of these performances. This study also deals with limits and potentialities set by conservation principles and current protection rules.

To reach this purpose, an analysis method involving both technical components and the building scale has been used. This research examines techniques and materials of Palermo's building tradition in terms of energy performances, particularly for what concerns the envelope. At the same time, it

mitana; al contempo considera i caratteri dimensionali e morfologici degli edifici, le principali soluzioni distributive e le forme di aggregazione nel tessuto urbano.

Anche per l'architettura storica di Palermo non è tuttora disponibile una raccolta dettagliata di informazioni specifiche sulle prestazioni termiche e igrometriche relative ai materiali e ai componenti della tradizione locale. Questo costituirebbe un valido ausilio non solo per indagini su vasta scala, ma anche per la progettazione degli interventi di recupero. Come per altri contesti locali, tuttavia, sono poche le informazioni specifiche per quello analizzato.

In quest'ottica, nella ricerca si pone particolare attenzione alle murature, il cui contributo alle prestazioni della fabbrica è essenziale ma difficilmente stimabile, a causa delle molte incertezze che affliggono le informazioni disponibili e le modalità di calcolo. Per contribuire alla loro caratterizzazione si sono determinate in laboratorio la conducibilità termica e le proprietà igrometriche di alcuni campioni di calcarenite conchiliare provenienti da edifici cittadini ottocenteschi. Al contempo si è misurata in opera la conduttanza termica delle murature storiche di un complesso monumentale palermitano, caratterizzato da un'ampia casistica di murature realizzate in epoche differenti e con diversi apparecchi costruttivi.

Le misure di conducibilità sono state svolte durante un periodo di studio presso il Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) di Holzkirchen (Monaco di Baviera). Quelle di conduttanza sono state condotte presso la Galleria d'Arte Moderna di Palermo grazie a una collaborazione scientifica con l'ENEA e con la società AMG Energia di Palermo.

also considers the dimensional and morphological characteristics of buildings, the main distribution solutions and the building aggregation in the urban fabric.

Also for Palermo's historic architecture, a detailed collection of specific information about thermic and hygrometric performances of local tradition materials and components is not available yet. It would represent an helpful instrument, not only for large scale studies, but also for buildings' restoration procedures. However, as for other local contexts, there are only few specific data available for the analysed area.

In this perspective, a special attention has been drawn to masonry, whose contribution to building performances is essential but hardly estimable because of a great uncertainty in available information and calculation methods. Therefore, thermal conductivity and hygrometric properties of calcarenite specimens coming from XIX century buildings of Palermo have been determined by means of laboratory tests. At the same time, the thermal conductance of the historic stone walls in a monumental building of Palermo has been measured. This building is characterized by many types of walls, built in different ages with different construction techniques.

The thermal conductivity measures have been carried out during a study period at the Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, Germany. Conductance measures have been carried out at the Modern Art Gallery of Palermo, thanks to the scientific collaboration with ENEA and the Company AMG Energia of Palermo.

Una conoscenza anche approfondita delle proprietà termiche e igrometriche dei materiali storici, e di conseguenza delle prestazioni dei singoli componenti, non è sufficiente a valutare il fabbisogno energetico e la qualità ambientale interna dell'edificio e a individuare le soluzioni più opportune per il loro miglioramento. Infatti le prestazioni di una costruzione, così come i limiti all'intervento, dipendono dal suo comportamento d'insieme e dall'interazione con gli impianti.

Numerosi studi hanno indagato i caratteri distributivi, morfologici e aggregativi ricorrenti dell'architettura storica di Palermo, ma anche le loro numerose varianti, dettate dall'evoluzione storica degli edifici e dal loro inserimento nel tessuto urbano. Per poter astrarre delle considerazioni di carattere generale, che costituiscano un utile riferimento per il patrimonio indagato, è opportuno riferirsi a un insieme ridotto di costruzioni che possano ritenersi rappresentative di gruppi più ampi.

In quest'ottica, nella ricerca si adatta al caso di Palermo il metodo di descrizione per categorie edilizie che il progetto comunitario Effesus ha recentemente proposto per comparti omogenei di architettura storica. Esso si basa principalmente sulle caratteristiche geometriche e dimensionali del patrimonio indagato e definisce una struttura generale specificabile per le caratteristiche del singolo contesto e soprattutto per i vincoli di tutela cui esso è sottoposto. L'applicazione a Palermo è stata condotta durante un soggiorno di studio presso il Campus Gotland dell'Università di Uppsala, in Svezia, Istituto che si è occupato dell'elaborazione del metodo.

In particolare, nel caso palermitano si fa riferimento alle caratteristiche aggregative e dimensionali degli edifici, al fine d'indagare,

A deep knowledge of thermal and hygrometric properties of historic materials and the performances of single components is not sufficient to assess energy requirements, to evaluate the indoor environmental quality of a building, and to find the appropriate solutions for their improvement. In fact, construction performances and the limit to intervention depend on the behaviour of the construction as an entire body and on the interactions with services.

Several studies investigated distribution, morphology and aggregation recurrent features of Palermo's historic architecture and their numerous variants, determined by the historic evolution of buildings and their integration in the urban fabric. In order to make some general useful remarks, it is appropriate to look at few constructions which might be representative of larger groups.

The method of buildings' categorisation recently suggested by the European Effesus project for historic districts is suitable for the case of Palermo and is based on the geometric and dimensional features of the investigated architectural heritage. This method defines a general structure, which can be implemented by the specific characteristics of the single context and, particularly, the necessary normative constraints. The method has been applied to Palermo during a study period at the Campus Gotland, Uppsala University, Sweden, where the method has been developed.

Particularly, in the case of Palermo, aggregation and dimension features of buildings have been studied, with the aim to investigate the current performances and the effectiveness of available improvement techniques for the most common

per le soluzioni costruttive più diffuse e sulla base di dati termofisici affidabili, le prestazioni attuali e l'efficacia delle tecniche d'intervento oggi disponibili. Per esaminare l'ammissibilità di queste, la struttura del metodo è stata intrecciata con l'approccio tipologico che la legislazione urbanistica ed edilizia cittadina adopera per regolare le attività sul costruito storico. Si ritiene infatti che la struttura tipologica esistente, che si riferisce anche ad aspetti distributivi e aggregativi, sia correlabile con le prestazioni energetiche degli edifici. Il legame con le tipologie di norma mira peraltro a indagare le possibilità d'integrazione fra gli interventi di miglioramento energetico e le pratiche ammesse per il recupero e la conservazione dell'architettura storica di Palermo.

I limiti del metodo e le sue possibilità d'impiego sono stati esaminati attraverso l'analisi di tre edifici rappresentativi, scelti sulla base dei valori di riferimento individuati per ciascuna categoria edilizia. Le tre costruzioni sono state oggetto di modellazione informatica attraverso il programma WUFI Plus, impiegato anch'esso durante il soggiorno di studio presso il Fraunhofer-Institut für Bauphysik di Holzkirchen (Monaco di Baviera).

Nell'esposizione dell'esperienza di ricerca, l'evoluzione del concetto di sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni, delineata nel primo capitolo, consente di mettere in evidenza principi, come quelli di compatibilità, reversibilità e precauzione, attraverso i quali analizzare il quadro normativo vigente e il dibattito sull'introduzione dell'esigenza di efficienza energetica nell'ambito degli edifici storici. Il secondo capitolo riporta i principali percorsi seguiti dalle ricerche che si confrontano con la conser-

construction solutions, by means of reliable thermo-physical performances. To assess the compatibility of modern working techniques, the categorisation method was associated with the typological approach used by the local legislation to rule building activities concerning historic constructions. The starting point of the analysis is the assumption that the existing typological structure, since referred also to distribution and aggregation aspects, is related to the energy performances of buildings. Furthermore, the link with normative typologies aims to assess the possibility of integration between energy improvement measures and practices admitted for the restoration and conservation of the historic architecture of Palermo.

The limits of the method and its possible uses have been examined by analysing three representative constructions, whose choice is based on reference values identified for each building category. A model of the three buildings has been elaborated by means of the software WUFI Plus, employed during the study period at the Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany.

The evolving concept of environmental sustainability in the building sector, described in the first chapter of the thesis, allows to highlight principles used to examine the current legislation and the debate on the need for energy efficiency also in historic buildings, such as compatibility, reversibility and precaution. The second chapter concerns the main paths of current researches which face the preservation and restoration of the historic heritage in the perspective of environmental

vazione e il recupero del patrimonio storico in una prospettiva di sostenibilità ambientale ed efficienza nel consumo delle risorse. Esse mostrano una molteplicità di approcci, che spaziano dall'indagine di singoli componenti tecnici sino alla scala urbana.

Il terzo capitolo traccia un quadro sintetico dei principali parametri che descrivono il comportamento termico e igrometrico degli elementi tecnici d'involucro, nonché degli aspetti che, specifici della costruzione o legati al contesto di cui essa fa parte, influenzano le prestazioni complessive dell'edificio.

Questa disamina si concentra anche sui requisiti che dalla normativa nazionale discendono per gli edifici palermitani e sui dati termofisici applicabili al patrimonio storico della città. Nel quarto capitolo si propone quindi un contributo alla caratterizzazione termofisica delle murature storiche di Palermo, sulla base delle citate misure di conducibilità e conduttanza termiche .

Questi parametri sono il supporto attraverso il quale nel quinto capitolo si indagano, fra le tecniche oggi disponibili, quelle potenzialmente ammissibili per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici storici. La loro applicabilità ed efficacia in relazione ai caratteri specifici del caso palermitano sono discusse nella parte conclusiva della tesi.

A tal fine, nel sesto capitolo si espone l'applicazione del metodo di descrizione per categorie del progetto Effesus a una porzione rappresentativa del centro storico di Palermo. Il settimo capitolo, infine, espone la modellazione termica di tre edifici rappresentativi, del quale si analizzano le prestazioni attuali e le possibilità di miglioramento energetico attraverso diverse ipotesi d'intervento sull'involucro edilizio.

sustainability and resource use efficiency. These studies show a significant variety of approaches, from the investigation of single technical component to the urban scale.

The third chapter draws a synthetic picture of the main parameters describing the thermal and hygrometric behaviour of envelope technical elements and the other factors, specific of constructions or context related, influencing the overall building performances.

This examination is focused also on the requirements concerning buildings in Palermo and coming from the national legislation, and on the thermo-physical data applicable to the historic heritage of the town. In the fourth chapter, a contribution to the thermo-physical characterisation of Palermo's historic masonry, based on the already cited measures of thermal conductivity and conductance, is exposed. These parameters are used in the fifth chapter to investigate the techniques, useful to improve the building energy performance, which may be compatible to the historic architecture. Their applicability and effectiveness in the specific case of Palermo are discussed in the final part of this thesis.

For this purpose, the sixth chapter reports the application of the Effesus project categorisation method to a representative part of the historic centre of Palermo. Finally, the seventh chapter exposes the thermal modelling of three representative buildings, whose current performances have been analysed, together with their possible energy improvement, through several hypothesis of operations on the building envelope.

CAPITOLO 1

La sostenibilità nel campo dell'architettura storica

Sustainability and historic architecture

ABSTRACT - *The early awareness of the significance the building sector has in the achievement of a sustainable development has evolved during the last decades of the XX century. The result is an articulated concept, which matches resources consumption, health, indoor comfort, as the definition proposed by C. Kibert in 1994 for sustainable construction shows.*

The quick focus here exposed on this principle aims at connecting the research topic, energy efficiency, to the several aspects contributing to the environmental quality of buildings. The evolution of sustainability in the construction sector highlights relevant concepts such as precaution, compatibility and reversibility, which constitute the general frame for laws and strategies aspiring to a sustainable construction. They are the base from which the European and Italian regulation concerning energy efficiency is analysed.

In the EU construction products Regulation 305/2011, energy efficiency is one of the base requirements for constructions, together with mechanical strength, hygiene and sustainable use of natural resources. Similarly, in the rating systems for sustainable building works and management, energy performance is one aspect of the overall quality, whose components include indoor quality, health risks for workers and occupants, environment pollution, consumption of water and building materials. Regulated by a normative body including the REACH Directive and EU Eco-label, these several aspects should influence the choice of materials and techniques for the building performance enhancement, although the economic relevance of energy savings.

In the field of historic architecture, the concept of sustainable building has to be considered in the light of the cultural and social significance of the architectural heritage. The mentioned principles of precaution and reversibility acquire new sense when referred to the conservation of historic constructions, which can be regarded in themselves as not-renewable sources. In this perspective, sustainability is becoming a new element in the complex panorama of restoration theories. As the scientific debate demonstrates, different meanings are attributed to this concept.

Sometimes it is interpreted as a synonym of technical and functional compatibility and only a secondary or even marginal role is left to the environmental dimension of sustainability.

Moving through this debate, the topic of energy efficiency in historic buildings and its issues are introduced. The Italian implementation of the Directive 2010/31/EU has maintained the exemption of protected buildings from the achievement of minimum energy requirements. Nonetheless it excludes many vernacular constructions and it is not enough to protect even monumental buildings from the damages of an inappropriate energy refurbishment. For these reasons several researches embrace the idea that neither requirements nor derogation are the most suitable approach, but an attempt to improve the performances of the historic building in so far as the conservation of its material and aesthetic features allows.

La prospettiva di uno sviluppo sostenibile nel settore edile e più in generale in quello delle costruzioni consiste nel soddisfare le esigenze del presente limitando al minimo le conseguenze negative per l'ambiente e incoraggiando, al contempo, miglioramenti economici, sociali e culturali. Come sottolinea la norma ISO 15392:2008, infatti, anche in ambito edile sono tre, e fra loro interdipendenti, gli aspetti primari della sostenibilità, quello ambientale, quello economico e quello sociale.

Le attività, i prodotti e i servizi coinvolti nei lavori di costruzione e nell'uso degli edifici producono, accanto a costi e benefici economici, effetti sugli ecosistemi, sulla qualità e quantità delle risorse naturali, sulla salute e sul benessere delle persone, sulla cultura e l'identità locale (ISO 15392). Se la dimensione economica della sostenibilità include la riduzione dei costi operativi e l'ottimizzazione del ciclo di vita degli edifici, dal punto di vista ambientale il settore edile può contribuire a uno sviluppo sostenibile attraverso la riduzione dei consumi energetici e idrici, delle emissioni di sostanze inquinanti e della produzione di rifiuti; in termini sociali, garantendo negli ambienti confinati migliori condizioni di benessere e quindi una miglior qualità di vita (ANIT, 2013).

L'interconnessione fra questi molteplici aspetti rende necessario un approccio complessivo, che, rivolto in una prospettiva di lungo termine al ciclo di vita degli edifici e dei loro componenti, deve essere applicato anche al tema dell'efficienza energetica. Questa, che per l'efficacia che le si attribuisce nel mitigare i cambiamenti climatici e per il suo consistente impatto economico attrae su di sé una parte consistente degli attuali sforzi normativi, scientifici e finanziari, è strettamente legata al soddisfacimento di adeguate condizioni di benessere termico, igrometrico e luminoso negli spazi interni; al contempo deve guardare al rapporto tra l'efficacia e i costi degli interventi e al loro impatto sull'ambiente e sulla salute delle persone.

L'intreccio di queste tematiche è chiaro anche nella nota definizione che Charles J. Kibert ha dato di *Sustainable Construction* nel 1994, in occasione della *Prima conferenza internazionale sul costruire sostenibile*, "*the creation and responsible management of a healthy built environment based on resource efficient and ecological principles*", in seguito approfondita attraverso l'elaborazione di sette principi, che includono la riduzione del consumo di risorse, il loro riuso e l'impiego di quelle riciclabili, la protezione della natura, l'eliminazione delle sostanze tossiche, l'applicazione del *Life-Cycle Costing*, l'attenzione alla qualità (Kibert, 2013).

Quando è riferito al costruito storico, il perseguimento di un modello di edilizia sostenibile si confronta con uno degli aspetti più importanti nella dimensione sociale della sostenibilità stessa, ovvero l'esigenza preponderante di conservare il patrimonio culturale e il suo valore identitario. Il bilanciamento fra queste istanze, in molti casi conflittuali, s'intreccia con i temi e i principi su cui classicamente si fondano le teorie del restauro e trova nel miglioramento delle prestazioni energetiche uno dei campi più fertili di discussione.

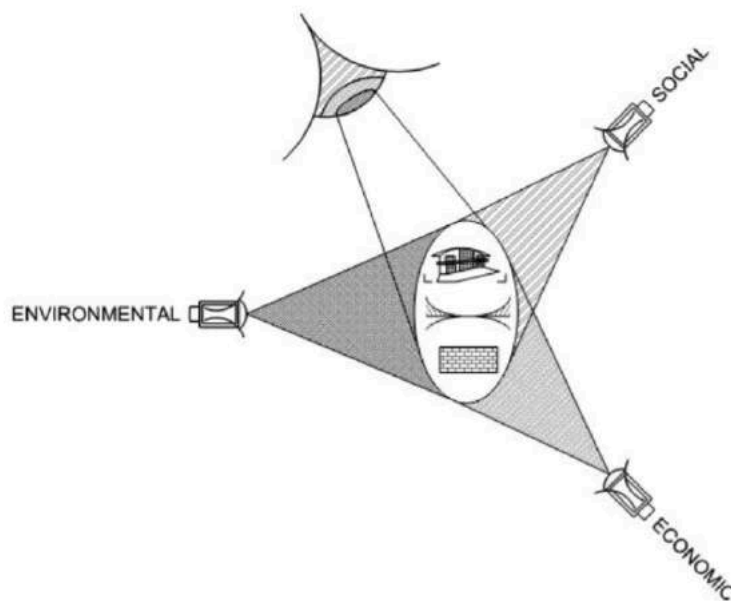


Figura 1.1. Anche nel settore edile la sostenibilità consta di tre aspetti primari: ambientale, economico e sociale. La figura, che esemplifica la necessità di una visione integrata, è tratta dalla norma ISO 15392:2008.

1.1 L'edilizia nella prospettiva di uno sviluppo sostenibile

Il coinvolgimento dell'edilizia nel dibattito su uno sviluppo sostenibile affonda le radici nelle politiche di austerità conseguenti alla crisi petrolifera del 1973, che in molti Paesi industrializzati, fra i quali l'Italia, sono state lo stimolo per adottare le prime norme in materia di efficienza energetica degli edifici. In realtà, com'è noto, il dibattito sulla sostenibilità dello sviluppo umano comincia a emergere con vigore già alcuni anni prima. Il 22 aprile 1970 si tiene la prima *Giornata della Terra*. Nel 1972 si pubblica il celebre rapporto *The Limits to Growth*¹, che sottolinea la necessità di superare un modello di crescita che, fondato sulla fiducia nella disponibilità illimitata di risorse a basso costo, non teneva conto dei limiti biofisici del pianeta. Nello stesso anno si tiene a Stoccolma la prima *Conferenza dell'ONU sull'ambiente umano*, in cui si sottolineano l'urgenza di un uso più razionale delle risorse e la necessità di proteggere e migliorare l'ambiente, e s'istituisce l'UNEP, *Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite*.

Parallelamente all'emergere dei sempre più evidenti danni delle attività antropiche all'equilibrio del pianeta, si sviluppano le ricerche sullo spessore dello strato atmosferico d'ozono e sulla sua riduzione, che dopo anni di studi e la dimostrazione di un considerevole assottigliamento in Antartide spingono i governi mondiali a sottoscrivere nel 1987 il *Protocollo di Montreal*, che impone la progressiva riduzione della produzione e dell'impiego di clorofluorocarburi (CFC) e di altre sostanze alogenate, ritenuti i principali responsabili del fenomeno. Sempre negli anni Settanta si mette in discussione la trascurabilità degli effetti di lungo periodo della crescente concentrazione di CO₂ e altri gas in atmosfera e aumenta l'attenzione al tema dei cambiamenti climatici. Di conseguenza, nel 1979 si tiene a Ginevra la prima *Conferenza mondiale sul Clima*, mentre la *Convenzione*

sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza, siglata proprio a Ginevra nel 1979, è il primo accordo internazionale a fissare dei valori limite per gli inquinanti atmosferici pericolosi per l'ambiente².

Nel 1980 la pubblicazione di due celebri documenti, il rapporto *Global 2000* al Presidente degli USA, che fa il punto sulla grave situazione ambientale del tempo e sulla necessità e urgenza di porvi rimedio, e la *World Conservation Strategy*, elaborata dall'*International Union for Conservation of Nature* (IUCN), testimoniano verso la questione ambientale un interesse crescente, che nel 1987 culmina nella stesura del celebre rapporto *Our Common Future*, più comunemente noto come *Rapporto Brundtland*, da parte della *Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo* (WCED).

Sebbene le prime leggi nazionali sull'efficienza energetica siano dettate da ragioni essenzialmente economiche, la sensibilità verso l'impatto ambientale delle attività umane tocca ben presto anche il settore edile. In effetti, diversi studi avevano continuato a coltivare l'attenzione, rintracciabile nelle pratiche costruttive tradizionali, verso la capacità delle costruzioni di garantire il benessere termico e igrometrico degli utenti (si citano ad esempio quelli celebri dei fratelli Olgay; Olgay, 2013). Quest'interesse, ora, si estende anche all'ecologia e alla salubrità degli edifici e dei materiali che li compongono. Già all'inizio degli anni Settanta, infatti, si rivolge l'attenzione all'insorgenza di problemi respiratori fra i lavoratori impiegati in uffici dotati di impianti di condizionamento dell'aria; alcuni avvenimenti, in particolare l'infezione nota come "malattia del legionario" registratasi a Philadelphia nel 1976, spingono a studiare la qualità degli spazi confinati, che in molti casi risulta scadente³, ma anche i possibili rischi per la salute umana ad essa connessi. Diversi studi ascrivono alla presenza di contaminanti chimici e biologici, nonché alla scarsa ventilazione (peraltro conseguenza della maggior tenuta all'aria con la quale si mira a contenere i consumi energetici delle costruzioni), il manifestarsi della cosiddetta sindrome dell'edificio malato (*Sick Building Syndrome*, SBS), una combinazione di disturbi legati alla permanenza prolungata in ambienti chiusi; con l'individuazione di precise patologie e dei relativi agenti concausali, si definiscono anche le malattie correlate all'edificio (*Building Related Illnesses*, BRI).

Se già da decenni era nota la pericolosità per l'uomo di alcuni materiali, quali il piombo, negli anni Ottanta e Novanta si moltiplicano gli studi che indagano e in diversi casi dimostrano la tossicità o la cancerogenicità di numerose sostanze, come quelle organiche volatili (COV o VOC) presenti in molti componenti per l'edilizia quali collanti, adesivi, lavorati del legno. A tal proposito, fra il 1985 e il 1987, diverse ricerche sono condotte in vari Paesi (Italia, Paesi Bassi, Repubblica Federale Tedesca, Stati Uniti d'America) su un numero considerevole di edifici (Maroni, Seifert, e Lindvall, 1995) e negli anni Novanta viene elaborato un sistema, EMICODE, per la classificazione dei prodotti in base alle emissioni di composti organici volatili⁴.

In questo quadro, nel 1992 la celebre *Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo* (UNCED, nota anche come *Earth Summit*), tenutasi a Rio de Janeiro, produce fra i documenti ufficiali la *Dichiarazione di Rio sull'ambiente e lo sviluppo* e il programma

d'azione *Agenda 21*⁵. La *Dichiarazione* enuclea una serie di principi che trovano implicazioni significative anche nel settore edile. Fra questi, in particolare, il primo è il diritto degli esseri umani a una vita sana e produttiva in armonia con la natura, che, come il CIB (*International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, prima *Conseil International du Bâtiment*) sottolinea nella sua *Agenda 21 on sustainable construction* (1999), si traduce in edilizia nell'importanza della qualità ambientale interna (IAQ), da cui dipendono il benessere e la salute degli occupanti. Si cita anche il quindicesimo principio della *Dichiarazione*, che per la tutela dell'ambiente promuove l'applicazione da parte degli Stati del "principio di precauzione". Questo, riconosciuto per la prima volta con la *Carta mondiale della natura* (1982) e introdotto nel 1997 con il Trattato di Amsterdam nell'articolo 174 del Trattato costitutivo della Comunità Europea (COM(2000) 1 final), è essenziale per condurre l'innovazione anche nel settore edile⁶.

Agenda 21 è invece un piano d'azione per la sostenibilità, articolato in quaranta capitoli che trattano i numerosi ambiti nei quali assicurare l'integrazione fra ambiente e sviluppo attraverso azioni da condurre sia su scala globale, sia su scala nazionale e locale attraverso le *Agende 21 locali*. Rientrano in questo contesto, in Italia, il *Piano nazionale per lo sviluppo sostenibile in attuazione dell'Agenda 21 locale* (approvato dal CIPE nel 1993), il *Coordinamento Agende 21 locali italiane* (creato dalle amministrazioni pubbliche italiane a Ferrara nel 1999), l'istituzione del *Servizio per lo sviluppo sostenibile* (D.P.R. 549 del 1999). Grazie alle *Agende 21 locali*, che stimolano la riqualificazione edilizia dei centri urbani e delle periferie, negli anni Novanta si rinnova l'attenzione verso le città e il loro potenziale contributo a uno sviluppo sostenibile come testimoniano le *Conferenze europee sulle città sostenibili*, avviate ad Aalborg nel 1994. Peraltro, proprio in occasione della *Conferenza internazionale sugli insediamenti urbani, Habitat II*, tenuta dall'ONU a Istanbul nel 1996, si definiscono gli impegni per uno sviluppo sostenibile nel settore delle costruzioni, che il CIB sintetizza, nella propria *Agenda 21 on sustainable construction* (1999), in un quadro complesso di tematiche che tuttora muovono l'innovazione tecnologica e la ricerca nel settore edilizio: la qualità ambientale interna, l'attenzione al clima e alle tradizioni costruttive nel miglioramento prestazionale delle costruzioni, la riduzione del consumo di risorse da parte degli edifici e del contenuto di energia e materiali dei componenti edilizi, la necessità di maggior manutenibilità e riciclabilità.

1.2 Norme e strumenti per la sostenibilità nel settore delle costruzioni

Nell'ottobre del 1972, in occasione di un vertice dei capi di Stato e di Governo tenutosi a Parigi, la Comunità europea riconosce la necessità di dare adeguata attenzione al tema ambientale nell'ambito delle politiche comuni di espansione economica e miglioramento della qualità di vita. Promuove a tale scopo, per il periodo 1973-1976, il primo dei *Programmi Quadro d'azione ambientale*, che sono alla base di numerose direttive comunitarie inerenti alla tutela delle risorse naturali, alle emissioni sonore, alla gestione dei rifiuti. In seguito, con l'Atto Unico europeo del 1986, l'inserimento nel Trattato della Comunità

Economica Europea di un titolo specifico sull'ambiente fa di questo uno dei cardini della politica comunitaria, come confermato dal Trattato di Maastricht del 1992⁷.

I *Programmi d'azione per l'ambiente* dell'Unione Europea mostrano il riconoscimento delle priorità della difesa ambientale, della salute, della gestione sostenibile delle risorse che, stimolato anche dai *Protocolli della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici* (siglata a Rio de Janeiro nel 1992), coinvolge direttamente il settore edilizio⁸. Secondo le strategie dell'Unione incentrate sulla promozione di uno sviluppo sostenibile (COM(60)2004 definitivo), in edilizia questo consiste nel far sì che le attività di costruzione e ristrutturazione creino un ambiente edificato "gradevole, durevole, funzionale, accessibile, comodo e sano; efficiente sotto il profilo delle risorse (soprattutto a livello di energia, materiali e acqua), in grado di favorire l'uso di fonti di energia rinnovabili [...]; rispettoso dell'ambiente circostante e della cultura e dei patrimoni locali; competitivo in termini di costi, soprattutto in una prospettiva a lungo termine".

Anche nei *Programmi Quadro* per la ricerca e l'innovazione, il primo dei quali relativo agli anni 1984-1988, l'ambiente, la salute e l'energia sono fra gli ambiti sui quali concentrare gli sforzi per il progresso. Lo sviluppo sostenibile, infatti, è uno dei temi principali del quinto *Programma Quadro* (1998-2002) e costituisce l'obiettivo generale del settimo (2007-2013). L'attuale strategia *Europa 2020*, approvata nel 2010, nel perseguire una crescita "intelligente, sostenibile e inclusiva", si prefigge per il 2020 di ridurre del 20% le emissioni di gas serra dell'Unione rispetto ai livelli del 1990, di incrementare del 20% la proporzione delle energie rinnovabili nel consumo finale e di aumentare del 20% l'efficienza energetica (COM(2010) 2020). In questa prospettiva s'inserisce il nuovo *Programma Quadro, Orizzonte 2020*, volto a potenziare le azioni concernenti il clima e l'efficienza nell'uso delle risorse. Si citano tra gli altri l'attenzione ai materiali in termini d'impatto ambientale, di contenuto di riciclato e di emissioni, nonché l'obiettivo di rendere quasi nullo il consumo energetico degli edifici, nuovi ed esistenti.

Queste considerazioni trovano applicazione anche nel quadro comunitario di norme inerenti al settore edilizio. Il Regolamento comunitario 305 del 2011, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione, indica i requisiti di base delle opere di costruzione, in funzione dei quali possano stabilirsi le caratteristiche essenziali dei prodotti da costruzione. Fra questi sette requisiti, che devono essere soddisfatti per una durata di servizio economicamente adeguata, rientrano "igiene, salute e ambiente", "risparmio energetico e ritenzione del calore", "uso sostenibile delle risorse naturali"⁹. Del resto anche la norma UNI 11277:2008, nel definire un quadro di esigenze e requisiti per l'"ecocompatibilità" in ambito edile, introduce come classi di esigenze la salvaguardia dell'ambiente, l'utilizzo razionale delle risorse, nonché benessere, igiene e salute dell'utente. Sempre in ambito italiano, peraltro, accanto alle prescrizioni normative concernenti gli studi di fattibilità ambientale e la valutazione di impatto ambientale, il D.P.R. 207 del 2010, regolamento d'attuazione del Codice degli appalti (D. Lgs. 163 del 2006), sancisce all'articolo 15 che "la progettazione ha come fine fondamentale la realizzazione di un intervento di

qualità e tecnicamente valido, nel rispetto del miglior rapporto fra i benefici e i costi globali di costruzione, manutenzione e gestione. La progettazione è informata ai principi di sostenibilità ambientale nel rispetto, tra l'altro, della minimizzazione dell'impegno di risorse materiali non rinnovabili e di massimo riutilizzo delle risorse naturali impegnate dall'intervento e dalla massima manutenibilità, miglioramento del rendimento energetico, durabilità dei materiali e dei componenti, sostituibilità degli elementi, compatibilità tecnica ed ambientale dei materiali ed agevole controllabilità delle prestazioni dell'intervento nel tempo" (Casini, 2013).

Agenda 21 on sustainable construction (CIB, 1999) evidenzia l'importanza di elaborare sistemi volti a certificare, attraverso la valutazione del ciclo di vita, le prestazioni degli edifici e le caratteristiche ecologiche dei materiali da costruzione. In quest'ambito rientrano le norme tecniche internazionali sui sistemi di gestione ambientale (serie ISO 14000), sulle etichettature ambientali di prodotto (serie ISO 14020), sulla valutazione del ciclo di vita (serie ISO 14040)¹⁰. Su queste norme si basano, ad esempio, le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD, *Environmental Product Declaration*, regolate dalle norme ISO delle serie 14020 e 14040 e in particolare dalla ISO 14025:2006), che il regolamento europeo 305 del 2010 promuove per valutare l'uso sostenibile delle risorse e l'impatto delle opere di costruzione sull'ambiente. La certificazione dei prodotti edilizi è uno strumento importante di comunicazione, che mira a promuovere quelli caratterizzati da un basso impatto ambientale attraverso requisiti attinenti al loro ciclo di vita: valutando gli impatti ambientali più significativi (sul clima, sulla biodiversità, sul consumo di risorse, ma anche in termini di produzione di rifiuti, emissioni e inquinamento), si promuovono la sostituzione delle sostanze pericolose con altre più sicure, la riciclabilità e il riutilizzo dei materiali.

In base alle indicazioni della serie ISO 14020, la dichiarazione ambientale di prodotto è un'etichettatura di tipo III (ISO 14025), che riporta cioè informazioni su parametri stabiliti ed è oggetto di verifica da parte di un ente indipendente di certificazione. Mentre le etichettature di tipo II (ISO 14021) sono autodichiarazioni ambientali che non prevedono tale forma di controllo (ne sono esempi le diciture "riciclabile" e "compostabile"), quelle di tipo I (ISO 14024) sono etichettature volontarie basate anch'esse sull'intero ciclo di vita e sottoposte a certificazione da parte di un ente indipendente. Queste ultime comprendono il marchio europeo di qualità ecologica *Ecolabel*, introdotto a livello comunitario nel 1992, con il quale sono stati definiti criteri ecologici in merito a numerosi prodotti, fra i quali quelli per verniciatura, le pavimentazioni, i mobili in legno, le pompe di calore, le lampade elettriche (Casini, 2013) e recentemente anche per gli edifici. Tale marchio, del resto, s'inserisce in un insieme variegato di etichettature ecologiche, introdotte nel corso degli anni da molti Paesi. Ne sono esempi il marchio tedesco *Blauer Engel* (1978), il canadese *Environmental Choice* (1988), gli statunitensi *Green Seal* (1989) ed *Energy Star* (1992), lo scandinavo *White Swan* (che, introdotto nel 1989 da Svezia, Danimarca, Finlandia e Islanda, è il primo marchio transnazionale).

Oltre che per i prodotti da costruzione, nel corso degli anni si sono sviluppati anche sistemi di valutazione della sostenibilità rivolti all'edificio nel suo complesso. Mentre la

certificazione energetica (cfr. par. 1.4), che serve a orientare le scelte di mercato verso edifici a migliore rendimento, è obbligatoria, in Italia la certificazione ambientale, che tiene in conto anche l'impatto della costruzione sull'ambiente e sulla salute dell'uomo, è volontaria e diviene cogente, in alcuni ambiti locali, per accedere a incentivi volumetrici ed economici. La progressiva diffusione di questi sistemi di valutazione ha indotto all'elaborazione di norme tecniche internazionali che ne regolano i principi generali e i requisiti. Si citano a tal proposito le ISO 21931-1:2010 e 21929-1:2011, nonché le quattro parti della UNI EN 15643, che, pubblicate fra il 2010 e il 2012, affrontano la valutazione delle prestazioni ambientali, sociali ed economiche delle costruzioni (ANIT, 2013).

Il primo di questi sistemi, noto con la sigla *BREEAM*, è introdotto in Gran Bretagna nel 1990 (Casini, 2013). Nel 1996 una collaborazione internazionale fra enti di ricerca dà luogo al *Green Building Challenge*, che elabora un sistema di valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici sufficientemente flessibile da poter essere adattato alle specificità locali. Quest'esperienza, proseguita dal *Sustainable Building Challenge*, ha poi sviluppato la metodologia di valutazione *SBMethod*, da cui discende lo strumento di valutazione *SBTool* (base del protocollo italiano ITACA del 2004). Sempre negli anni Novanta, negli Stati Uniti, l'organizzazione *U.S. Green Building Council* sviluppa il protocollo *LEED* (*Leadership in Energy and Environmental Design*), proposto per la prima volta sul mercato nel 2000. Questi strumenti di certificazione valutano la sostenibilità dell'edificio tenendo conto dei molteplici aspetti che concorrono a definirlo: il rapporto con il sito, i carichi ambientali, il consumo di risorse, la qualità ambientale, le innovazioni tecnologiche.

In generale, gli approcci valutativi sui quali essi si basano sono due, un metodo quantitativo e uno qualitativo. Il primo si basa sull'analisi del ciclo di vita (LCA) dell'edificio e ne quantifica l'energia inglobata e l'impatto ambientale durante l'intero processo edilizio. Il secondo, sul quale si fondano i sistemi più diffusi, fa invece riferimento a un insieme di requisiti, cui corrispondono pesi e punteggi che, combinati fra loro, danno un'indicazione sul livello di sostenibilità dell'edificio.

I protocolli più diffusi in Italia, oltre al sistema di valutazione CasaClima¹¹, sono ITACA¹², affermatosi soprattutto a livello pubblico, e lo statunitense LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), più diffuso in ambito privato (ANIT, 2013). Entrambi i sistemi, distinti in vari protocolli in base alla destinazione d'uso degli edifici, fanno riferimento alle norme tecniche internazionali e, dunque, mostrano basi scientifiche e tecniche affini. Nel protocollo ITACA, infatti, le aree di valutazione riguardano la "qualità del sito", il "consumo di risorse", i "carichi ambientali", la "qualità ambientale indoor" e la "qualità del servizio"; similmente, le aree di valutazione del protocollo LEED trattano di "siti sostenibili", "gestione delle acque", "energia e atmosfera", "materiali e risorse", "qualità dell'ambiente interno", "innovazione" e "specificità regionali". Nel protocollo ITACA, attraverso i punteggi conseguiti per ogni criterio sulla base dei pesi assegnati a ciascuno, alla costruzione si attribuisce una valutazione compresa fra -1 e 5, nella quale a 0 corrisponde la prestazione minima accettabile definita dalle leggi o dai regolamenti vigenti. Invece nel

sistema LEED un insieme di prerequisiti obbligatori e di requisiti volontari consente di raggiungere un punteggio massimo di centodieci, in base al quale si stabilisce il livello di certificazione, la quale richiede almeno quaranta punti.

In entrambi i sistemi, un ruolo di particolare rilievo è attribuito all'efficienza energetica, il cui accrescimento è considerato (BPIE, 2011) il modo economicamente più efficace per raggiungere gli obiettivi in merito ai cambiamenti climatici. Nel protocollo ITACA, l'area relativa al "consumo di risorse" ha un peso del 45% nella valutazione complessiva e, di questa quota, il 60% si ascrive alle categorie "energia primaria non rinnovabile richiesta durante il ciclo di vita", "energia da fonti rinnovabili", "prestazioni dell'involucro" (UNI, 2015b). Nel sistema LEED (GBC, 2015b), dei centodieci punti conseguibili trentacinque afferiscono all'area "Energia e atmosfera" e, all'interno di questa, possono ottenersi fino a diciannove punti con l'"ottimizzazione delle prestazioni energetiche" e fino a sette con la "produzione in sito di energie rinnovabili".

1.3 Cenni alla legislazione sulle prestazioni energetiche degli edifici

Le stime comunitarie (BPIE, 2011) attribuiscono la quota più consistente del consumo finale di energia nell'Unione Europea, circa il 40%, agli edifici, seguiti dai trasporti (33%), dal settore industriale (24%) e da quello agricolo (2%). Si comprende dunque il ruolo che l'edilizia può assumere nel perseguire gli obiettivi comunitari, che prevedono, accanto a un risparmio energetico del 20% entro il 2020 rispetto ai consumi del 1990, anche una riduzione delle emissioni in atmosfera di gas a effetto serra pari all'80÷95% entro il 2050. Non a caso nel Piano di efficienza energetica del 2011 (COM(2011)109 *final*) la Commissione Europea individua il maggior potenziale di risparmio energetico proprio negli edifici (BPIE, 2011), che si stimano anche responsabili di circa il 36% delle emissioni di CO₂ dell'Unione in atmosfera. In quest'ottica, un ruolo essenziale ha l'accrescimento dell'efficienza energetica dell'edificato esistente; questo, nell'Europa meridionale, è costituito per il 37%¹³ da edifici già esistenti al 1960 e per il 49% da costruzioni realizzate fra questa data e il 1990 (fig. 1.2).

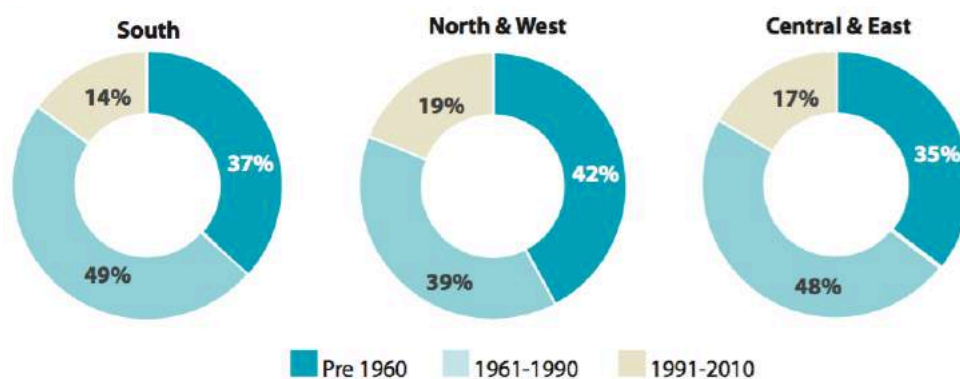


Figura 1.2. Analisi del patrimonio edilizio dell'Unione europea in base all'epoca di costruzione. Da BPIE (2011).

Il quadro normativo comunitario in materia di efficienza energetica degli edifici si fonda sulla direttiva 2002/91/CE, nota comunemente con la sigla EPBD (*Energy Performance Building Directive*), che prende le mosse dalle direttive inerenti ai prodotti da costruzione (1989/106/CEE), alle emissioni di anidride carbonica e al risparmio energetico (1993/76/CEE). La norma ha promosso un quadro metodologico generale per calcolare il rendimento energetico degli edifici, l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico per le nuove costruzioni e per la ristrutturazione di quelle esistenti, la certificazione energetica degli edifici e l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento d'aria.

In questo contesto, per promuovere l'uso di energia da fonti rinnovabili è stata emanata la direttiva 2009/28/CE (nota anche come direttiva RES). Questa richiede a ogni Stato membro di adottare un Piano di Azione Nazionale (PAN) nel quale fissare per settori (elettricità, riscaldamento e raffrescamento, trasporti) le quote di consumo di energia da fonti rinnovabili per il 2020, in conformità agli obiettivi nazionali previsti per quella data, che per l'Italia corrispondono a una percentuale del 17%. La direttiva promuove anche un ruolo esemplare degli enti pubblici in merito agli edifici di nuova costruzione e a quelli soggetti a ristrutturazioni rilevanti.

Per rafforzare il quadro comunitario in vista del raggiungimento degli obiettivi per il 2020, la direttiva 2002/91/CE è stata sostituita con la 2010/31/UE, che introduce fra l'altro disposizioni sugli "edifici a energia quasi zero"¹⁴ e sulle forme d'incentivazione fiscale adottate nel corso degli anni dagli Stati membri. Ulteriori innovazioni sul quadro comune di misure da perseguire sono state introdotte dalla 2012/27/UE. Questa specifica che, nell'ottica di investimenti nazionali volti alle strategie di lungo termine per la ristrutturazione degli edifici esistenti, gli Stati membri provvedano a una rassegna del parco immobiliare nazionale, se del caso per mezzo di campionamenti statistici; assegna un ruolo esemplare agli edifici utilizzati dagli enti pubblici¹⁵ e richiede anche che i governi centrali degli Stati membri acquistino esclusivamente "prodotti, servizi ed edifici ad alta efficienza energetica nel rispetto della coerenza costi-efficacia e della fattibilità economica" e incoraggino "gli enti pubblici a conformarsi al ruolo esemplare del governo centrale" (art. 6).

In ambito nazionale, le prime norme in materia di efficienza energetica sono la legge 373 del 1976 e la 10 del 1991; quest'ultima, abrogata la prima, ha definito un quadro organico di disposizioni per contenere i consumi energetici, rivolto non solo agli impianti ma anche all'involucro, e ha introdotto in Italia la certificazione energetica. La legge, oggi in vigore per pochi punti, è stata sostituita per il resto dal Decreto legislativo 192 del 2005, con il quale è stata recepita la direttiva 2002/91/CE. Il Decreto, più volte modificato nel corso degli anni, è stato corredato da un Regolamento d'attuazione, il D.P.R. 59 del 2009, e dalle "Linee guida per la certificazione energetica degli edifici", Decreto ministeriale del 26 giugno 2009. Il secondo definisce, appunto, il sistema di certificazione; il primo chiarisce i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi di prestazione energetica per l'edificio e i suoi impianti termici nonché i requisiti minimi dell'involucro edilizio fina-

lizzati a contenere i consumi energetici estivi. Mentre la direttiva 2009/28/CE è stata recepita con il Decreto legislativo 28 del 2011, al recepimento della 2002/91/CE si collegano anche altre disposizioni normative, come i D.P.R. 74 e 75 del 2013 sugli impianti e i soggetti certificatori, la legislazione sugli incentivi fiscali e le numerose ricadute sulle norme locali e i regolamenti edilizi, dovute anche alla ripartizione in ambito regionale degli obiettivi nazionali di efficienza energetica (Casini, 2013).

Il quadro normativo, in continua evoluzione, è stato modificato nuovamente con il recepimento della direttiva 2010/31/UE, avvenuta attraverso il Decreto Legge 63 del 2013, convertito poi nella Legge 90 del 2013. Fra le novità introdotte rientrano l'estensione delle previsioni del decreto 192 a tutti gli edifici, indipendentemente dalla superficie (prima fissata a 1.000 m²), la sostituzione dell'Attestato di Certificazione Energetica (ACE) con quello di Prestazione (APE) e la sua estensione agli edifici occupati dalla Pubblica Amministrazione, l'introduzione della definizione di "edifici a energia quasi zero" e l'individuazione di una strategia che, per mezzo di un apposito piano nazionale, porti tutti gli edifici di nuova costruzione a consumare, al 31 dicembre del 2020, una quantità quasi nulla di energia. Il recepimento nazionale della direttiva del 2010 è stato concluso con i decreti attuativi contenuti nel Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015, che regolano fra l'altro l'adeguamento delle linee guida nazionali del 2009 sulla certificazione energetica, l'applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e i requisiti minimi degli edifici.

Le prescrizioni della normativa nazionale si basano sulle tipologie di edificio e d'intervento. Le prime sono riportate dal D.P.R. 412 del 1993 e riguardano la destinazione d'uso. Le seconde sono state innovate dal Decreto ministeriale del 26 giugno 2015, che distingue nuove costruzioni, ristrutturazioni importanti e riqualificazioni energetiche¹⁶. In questo quadro s'individuano i requisiti da rispettare, che riguardano gli indici di prestazione energetica, il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente, la trasmittanza dei componenti opachi, delle chiusure trasparenti e dei divisori interni, le verifiche igrometriche, l'inerzia termica dell'involucro opaco, l'efficacia dei sistemi schermanti, il controllo estivo delle coperture, la quota d'impiego delle fonti rinnovabili, l'efficienza degli impianti di climatizzazione e produzione di acqua calda sanitaria, la diagnosi energetica, la regolazione automatica della temperatura per impianti di riscaldamento e la contabilizzazione del calore.

1.4 Il concetto di sostenibilità fra conservazione e restauro

L'architettura storica esprime valori culturali e identitari che ne fanno una risorsa "non rinnovabile", dunque può considerarsi "sostenibile" un approccio che miri a conservarla per le generazioni future. In questo senso, il principio di tutelare il patrimonio storico quale espressione d'arte, testimonianza storica e documento di cultura costruttiva coincide con il concetto di sostenibilità e questo stesso, ritenuto tuttora fortemente innovativo anche nel settore edile, appare già approfondito in molti dei suoi aspetti. È "sostenibile" un in-

tervento compatibile con i valori culturali e materiali dell'opera, che cioè non li alteri e non abbia su di essi conseguenze irreversibili, né dal punto di vista formale né da quello fisico. Possono così rintracciarsi chiari legami con alcuni principi cardinali delle teorie del restauro, come quello del "minimo intervento", nell'accezione che esso già aveva nel dibattito britannico sui restauri ottocenteschi (Ventimiglia, 2014).

Anticipazioni del concetto di sostenibilità sono individuati da Romeo (2014) nella relazione preliminare dei lavori della Commissione Franceschini (nei suoi riferimenti a un uso più attento delle risorse naturali e all'impiego di materiali tradizionali e innovativi nel restauro, nell'attenzione sociale al confronto fra popolazione e istituzioni); si rintracciano anche nel concetto di conservazione preventiva e programmata, cioè di un insieme organico di attività di prevenzione dai rischi ambientali e di manutenzione ordinaria, che peraltro consente un minor consumo di risorse rispetto agli interventi di restauro e coinvolge, attraverso la programmazione degli interventi, il tema della loro sostenibilità economica (Martines, 2014).

In questi termini, la sostenibilità della conservazione e del recupero dell'architettura storica sta anche nella scelta di destinazioni d'uso che, compatibili con i suoi caratteri, ne garantiscano la conservazione. Dunque coinvolge il dibattito sugli interventi e sulle trasformazioni utili o necessarie per avvicinare il costruito storico alle esigenze contemporanee, sia negli usi residenziali sia in quelli pubblici, quale tipicamente è quello museale.

Tuttavia una costruzione storica, oltre che un bene irriproducibile, è anche un "insieme di risorse riutilizzabili", delle quali la conservazione può estendere la vita utile (Musso e Romano, 2014). Anche da questo punto di vista non mancano aspetti intrinsecamente sostenibili, poiché il mantenimento e la riqualificazione di un edificio esistente evitano il consumo di nuovo suolo, consentono di ridurre quello di materiali e limitano la produzione di rifiuti. Tuttavia, come per le altre costruzioni esistenti, anche per quelle storiche il recupero, la manutenzione e la gestione si accompagnano ad attività edili, al dispendio di energia, a inquinamento.

In questa chiave di lettura, il concetto di sostenibilità ambientale assume per l'architettura storica i tratti consueti, legati al consumo delle risorse naturali, ai rischi per l'ambiente e per la salute delle persone (cioè degli occupanti e dei lavoratori edili), al benessere negli spazi confinati e in quelli aperti. Emergono così diversi aspetti "non sostenibili". Al patrimonio storico, infatti, si associa un fabbisogno energetico molto elevato, certamente superiore a quello conseguibile nelle nuove costruzioni o con la riqualificazione dell'edilizia recente; inoltre l'impatto delle tecniche di restauro sull'ambiente e sulla salute dei lavoratori è spesso non trascurabile, così come di frequente sono mediocri le condizioni interne degli edifici, ad esempio sotto il profilo della qualità luminosa.

Questi aspetti critici possono essere risolti o limitati attraverso pratiche e interventi che non ledano i caratteri propri dell'architettura storica. Dunque per essa, in un'ottica più generale, la sostenibilità dovrebbe essere intesa come tutela materiale di tale patrimonio, dei valori identitari e sociali che esso racchiude ma pure dell'ambiente naturale sul quale

produce i propri effetti (Vitiello, 2014). Allora è possibile pensare alla sostenibilità ambientale come a un paradigma cui improntare anche la conservazione e l'uso degli edifici storici, che miri cioè, nel preservare questo patrimonio, a limitarne il più possibile l'impatto ambientale. Parimenti il recente sviluppo di molte soluzioni tecniche che consentono di conseguire questo duplice obiettivo e l'importanza di valutarne la durabilità e le conseguenze di lungo termine rafforzano la necessità di adottare, per il patrimonio architettonico storico, quel principio di precauzione che grande importanza riveste nel perseguimento di uno sviluppo concretamente sostenibile.

1.5 Opportunità di miglioramento energetico ed esigenze di tutela

Nella conservazione dell'architettura storica il concetto di sostenibilità, e l'opportunità o necessità della sua applicazione, si confrontano con i rischi che per questo patrimonio potrebbero derivare da un miglioramento prestazionale volto a soddisfare l'accresciuta sensibilità verso i temi "ecologici". Si tratta, dunque, di un confronto fra esigenze che, in vari casi, possono risultare conflittuali: da un lato la conservazione dell'architettura storica, dall'altro la tutela dell'ambiente, della salute e del benessere delle persone. Se il regolamento europeo 305 del 2010 esenta i prodotti volti alla conservazione del patrimonio culturale dal rispetto dei requisiti di base per le opere di costruzione, sono molte le sostanze adoperate nel restauro che hanno effetti non trascurabili sugli applicatori, sull'ambiente circostante e sui fruitori. Allo stesso modo, le condizioni termiche e igrometriche ottimali per conservare i materiali dell'edificio e dei manufatti storici possono essere diverse da quelle idonee al benessere delle persone (GBC, 2015a e Camuffo, 2007).

Tale questione si pone anche per l'efficienza energetica. Anche in questo caso, infatti, sono preminenti le esigenze della conservazione (*Burra Charter*, 2013), che, poiché riguardano un bene non riproducibile d'interesse collettivo, rende accettabile un maggior costo in termini di consumo energetico (Fabbri, 2013). Del resto, come sottolineano Litti, Audenaert e Braet (2013), per il dibattito europeo su uno sviluppo sostenibile del patrimonio storico si rintracciano origini precoci nella prima conferenza dei ministri europei competenti per i beni culturali, tenutasi a Bruxelles nel 1969, e nei successivi congressi di Amsterdam (1975), Granada (1985) Helsinki (1996), Hannover (2000).

Una possibile risposta all'opportunità di accrescere l'efficienza energetica degli edifici storici discende dalla considerazione dei cambiamenti climatici e dei rischi fisici, sociali e culturali che questi comportano per il patrimonio culturale, come già da alcuni anni posto in evidenza dall'UNESCO (Colette, 2007, 2011) (fig. 1.3).

Table 1. Principal climate change risks and impacts on cultural heritage		
Climate indicator	Climate change risk	Physical, social and cultural impacts on cultural heritage
Atmospheric moisture change	<ul style="list-style-type: none"> - Flooding (sea, river) - Intense rainfall - Changes in water-table levels - Changes in soil chemistry - Ground water changes - Changes in humidity cycles - Increase in time of wetness - Sea-salt chlorides 	<ul style="list-style-type: none"> - pH changes to buried archaeological evidence - Loss of stratigraphic integrity due to cracking and heaving from changes in sediment moisture - Data loss preserved in waterlogged / anaerobic / anoxic conditions - Eutrophication accelerating microbial decomposition of organics - Physical changes to porous building materials and finishes due to rising damp - Damage due to faulty or inadequate water disposal systems; historic rainwater goods not capable of handling heavy rain and often difficult to access, maintain, and adjust - Crystallisation and dissolution of salts caused by wetting and drying affecting standing structures, archaeology, wall paintings, frescos and other decorated surfaces - Erosion of inorganic and organic materials due to flood waters - Biological attack of organic materials by insects, moulds, fungi, invasive species such as termites - Subsoil instability, ground heave and subsidence - Relative humidity cycles/shock causing splitting, cracking, flaking and dusting of materials and surfaces - Corrosion of metals - Other combined effects eg. increase in moisture combined with fertilisers and pesticides
Temperature change	<ul style="list-style-type: none"> - Diurnal, seasonal, extreme events (heat waves, snow loading) - Changes in freeze-thaw and ice storms, and increase in wet frost 	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioration of facades due to thermal stress - Freeze-thaw/frost damage - Damage inside brick, stone, ceramics that has got wet and frozen within material before drying - Biochemical deterioration - Changes in 'fitness for purpose' of some structures. For example overheating of the interior of buildings can lead to inappropriate alterations to the historic fabric due to the introduction of engineered solutions - Inappropriate adaptation to allow structures to remain in use
Sea-level rises	<ul style="list-style-type: none"> - Coastal flooding - Sea-water incursion 	<ul style="list-style-type: none"> - Coastal erosion/loss - Intermittent introduction of large masses of 'strange' water to the site, which may disturb the metastable equilibrium between artefacts and soil - Permanent submersion of low lying areas - Population migration - Disruption of communities - Loss of rituals and breakdown of social interactions
Wind	<ul style="list-style-type: none"> - Wind-driven rain - Wind-transported salt - Wind-driven sand - Winds, gusts and changes in direction 	<ul style="list-style-type: none"> - Penetrative moisture into porous cultural heritage materials - Static and dynamic loading of historic or archaeological structures - Structural damage and collapse - Deterioration of surfaces due to erosion
Desertification	<ul style="list-style-type: none"> - Drought - Heat waves - Fall in water table 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion - Salt weathering - Impact on health of population - Abandonment and collapse - Loss of cultural memory
Climate and pollution acting together	<ul style="list-style-type: none"> - pH precipitation - Changes in deposition of pollutants 	<ul style="list-style-type: none"> - Stone recession by dissolution of carbonates - Blackening of materials - Corrosion of metals - Influence of bio-colonisation
Climate and biological effects	<ul style="list-style-type: none"> - Proliferation of invasive species - Spread of existing and new species of insects (eg. termites) - Increase in mould growth - Changes to lichen colonies on buildings - Decline of original plant materials 	<ul style="list-style-type: none"> - Collapse of structural timber and timber finishes - Reduction in availability of native species for repair and maintenance of buildings - Changes in the natural heritage values of cultural heritage sites - Changes in appearance of landscapes - Transformation of communities - Changes the livelihood of traditional settlements - Changes in family structures as sources of livelihoods become more dispersed and distant

Figura 1.3. Principali rischi per il patrimonio culturale derivanti dai cambiamenti climatici. Da Colette (2007).

Più recentemente, nel progetto europeo *Climate for Culture* (Leissner, Kaiser, e Kilian, 2014), sulla base di una modellazione accurata nel medio e lungo periodo (sino al 2100) delle condizioni climatiche ordinarie nel continente europeo, si sono indagati i possibili fenomeni di degrado che la necessità di un nuovo equilibrio termico e igrometrico potrebbe provocare al patrimonio culturale mobile e immobile. A tale problema si può ovviare, da un lato, preparando il costruito storico a questi nuovi scenari, dall'altro, agendo per limitare le cause del cambiamento climatico. La prima via richiede una maggiore attenzione al controllo delle condizioni ambientali interne degli edifici storici, tuttora ritenuta in genere secondaria rispetto a esigenze come quella di sicurezza strutturale; in tal senso è significativa l'integrazione che alcune ricerche propongono fra la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito storico e le loro prestazioni energetiche e ambientali.

Per limitare le cause del cambiamento climatico, invece, uno dei metodi più efficaci dal punto di vista dei costi consiste nell'accrescere l'efficienza energetica degli edifici, che dipende dalle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro, dalle prestazioni degli impianti, dalla destinazione d'uso, dalle modalità di occupazione. Considerando la bassa incidenza delle nuove costruzioni sul parco edilizio comunitario, i risultati più rilevanti possono conseguirsi agendo sull'edificato esistente, una parte consistente del quale è formata da edifici storici.

L'elevata incidenza di questi sul patrimonio edilizio europeo è acclarata dalle statistiche raccolte nei Paesi membri nell'ambito di alcuni progetti comunitari quali TABULA ed EPISCOPE. Inoltre secondo i dati del Cresme (GBC, 2015a) il 18,3% del patrimonio edilizio italiano è antecedente al 1919 e l'11,8% è stato realizzato, dopo questa data, entro il 1945.



Figura 1.4. Distribuzione del patrimonio residenziale italiano (espresso in numero di edifici) per epoca di costruzione. Il grafico è desunto dal *Data Hub for the Energy Performance of Buildings* predisposto dal BPIE (<http://www.buildingsdata.eu>, consultato il 7 gennaio 2016) e riporta i dati raccolti dal progetto EPISCOPE, provenienti dal censimento ISTAT del 2011. *Buildings Performance Institute Europe ASBL* (2012).

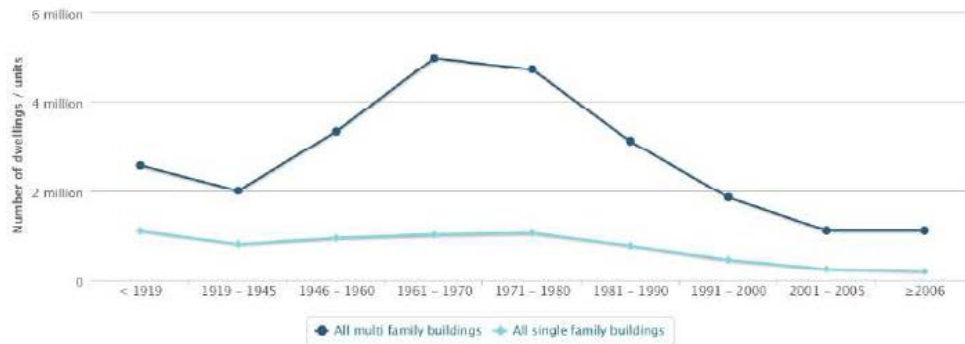


Figura 1.5. Distribuzione del patrimonio residenziale italiano (espresso come rapporto fra il numero di abitazioni e quello di edifici). Il grafico è desunto dal *Data Hub for the Energy Performance of Buildings* predisposto dal BPIE (<http://www.buildingsdata.eu>, consultato il 7 gennaio 2016) e riporta i dati raccolti dal progetto EPISCOPE, provenienti dal censimento ISTAT del 2011. *Buildings Performance Institute Europe ASBL* (2012).



Figura 1.6. Distribuzione del patrimonio non residenziale italiano (in termini di numero di edifici) per epoca di costruzione. Il grafico è desunto dal *Data Hub for the Energy Performance of Buildings* predisposto dal BPIE (<http://www.buildingsdata.eu>, consultato il 7 gennaio 2016) e riporta dati raccolti dall'ENEA nel 2010. *Buildings Performance Institute Europe ASBL* (2012).

Troi (2011), nell'analizzare il patrimonio residenziale comunitario esistente al 2001 nell'Unione Europea, evidenzia che le abitazioni precedenti al 1919 e quelle realizzate fra questa data e il 1945 costituiscono rispettivamente il 14% e il 12% del totale e solo una loro parte molto limitata è oggetto di tutela. L'autrice, inoltre, evidenzia la consistenza dei risparmi energetici e della riduzione di emissioni in atmosfera di gas a effetto serra che potrebbero conseguirsi applicando a tale patrimonio le norme esistenti in materia di efficienza energetica.

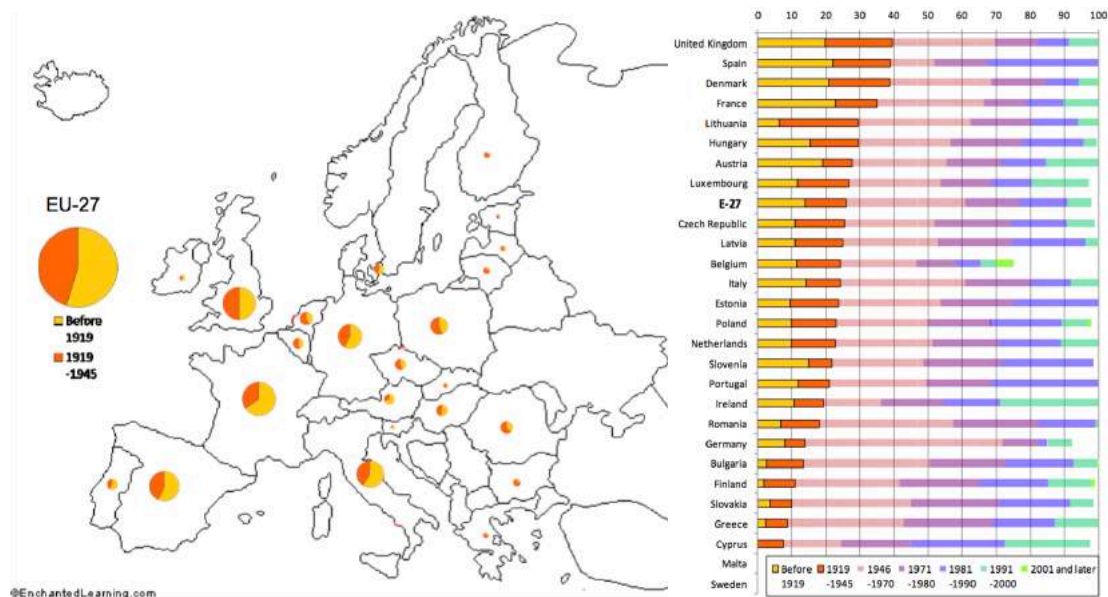


Figura 1.7. Analisi quantitativa delle abitazioni esistenti al 2001 nell'Unione Europea a ventisette Stati: *a sinistra* si evidenzia la distribuzione fra i vari Paesi degli edifici costruiti prima del 1919 e di quelli realizzati fra questa data e il 1945; *a destra*, gli Stati sono ordinati in base alla proporzione del patrimonio esistente al 1945 sul totale del parco edilizio nazionale. Da Troi (2011).

Al contempo, nel settore residenziale, l'epoca di costruzione dell'edificio, quando questo non è stato oggetto di riqualificazione, appare strettamente correlata ai suoi consumi energetici (BPIE, 2011). Le basse prestazioni che a livello statistico si associano al costruito storico (fig. 1.8) si aggiungono peraltro alle restrizioni che gli enti di tutela pongono nei confronti di consistenti interventi d'incremento prestazionale. Infatti per questo patrimonio vengono suggerite (BPIE, 2011) misure più contenute rispetto a quelle praticabili nell'edificato recente e dunque più facilmente realizzabili (si propongono cioè *minor and moderate measures* in luogo di una *total renovation*).



Figura 1.8. Confronto fra i livelli di consumo energetico per il riscaldamento (in kWh/m²/anno) nel patrimonio residenziale italiano distinto per epoca di costruzione. Il grafico, che riporta i dati elaborati nell'ambito dei progetti TABULA ed EPISCOPE, è desunto dal *Data Hub for the Energy Performance of Buildings* predisposto dal BPIE (<http://www.buildingsdata.eu>, consultato il 7 gennaio 2016). *Buildings Performance Institute Europe ASBL* (2012).

La riqualificazione del costruito postbellico, il quale è preponderante nel parco edilizio nazionale e comunitario, può determinare miglioramenti tali da rendere più sostenibile il mantenimento delle basse prestazioni del patrimonio architettonico storico. Tuttavia, a maggior ragione nell'ipotesi di un crescente divario con le costruzioni recenti, il miglioramento delle prestazioni energetiche e ambientali può divenire un contributo alla conservazione del costruito storico. Infatti, come sottolinea Carbonara (2014), "l'attenzione all'efficienza energetica del costruito storico può davvero rivelarsi come uno strumento di tutela: in primo luogo perché essa si traduce necessariamente in una più accurata e misurata progettazione delle necessarie provvidenze; in secondo luogo perché la menzionata "efficienza energetica" è, al tempo stesso, una componente essenziale della buona ed economica gestione degli edifici storici, a tutto vantaggio della loro vitalità e godibilità".

Se anche si ammette l'opportunità di migliorare le prestazioni energetiche e ambientali degli edifici storici, resta comunque la necessità che tali interventi, come quelli di consolidamento strutturale, soddisfino le esigenze della conservazione. A tal proposito Fouseki e Cassar (2014) sottolineano come la difficoltà d'identificare in termini oggettivi il valore culturale di questo patrimonio, che attiene ad aspetti materici, estetici, identitari, induca molte delle ricerche esistenti a limitare lo sviluppo della questione ai suoi aspetti più chiaramente quantificabili, cioè quelli che attengono alle prestazioni energetiche degli edifici e dei loro componenti e alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Del resto, all'assenza di criteri condivisi a livello comunitario sull'identificazione dei valori culturali da tutelare viene ricondotta (Litti et al., 2013) una delle principali criticità connesse al miglioramento prestazionale dell'architettura storica, quella cioè del giudizio sull'ammissibilità degli interventi proposti.

La direttiva europea 2002/91/CE ammette per gli edifici ufficialmente tutelati la deroga dal rispetto di requisiti minimi di efficienza energetica qualora ciò "implichi un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto"¹⁷. Questo criterio, mantenuto anche nella revisione della direttiva (2010/31/UE), è stato accolto dalla maggior parte dei Paesi membri e in Italia si traduce nell'esenzione per gli edifici tutelati secondo il Decreto legislativo 42 del 2004 in quanto beni culturali o parte di beni paesaggistici. Per essi, dunque, le uniche disposizioni certamente obbligatorie sono quelle riguardanti la certificazione energetica e l'ispezione periodica degli impianti, mentre il rispetto degli altri requisiti è subordinato al parere degli organi preposti alla tutela¹⁸. Tale impostazione normativa, che si rintraccia anche nella Direttiva 2012/27/UE, evita che il costruito storico sia adeguato in modo acritico a requisiti prestazionali sempre più stringenti, il cui rispetto produrrebbe in molti casi un impatto fortemente negativo sui caratteri formali e materici della costruzione; tuttavia tampona il problema ma non lo risolve.

La deroga, infatti, non si applica a tutto il patrimonio architettonico storico ma a quello soggetto ufficialmente a tutela. Per gli edifici facenti parte di beni paesaggistici, dunque, il controllo è limitato essenzialmente agli interventi che incidono sull'aspetto esteriore della costruzione; soprattutto, una parte consistente del patrimonio architettonico, formata

dall'edilizia di base, resta soggetta agli stessi requisiti previsti per gli edifici di recente costruzione. Eppure, se non dal punto di vista artistico, almeno come documento di cultura costruttiva essa ha un valore culturale rilevante, che richiederebbe anche nell'ambito dell'efficienza energetica l'adozione di metodi omogenei rispetto a quelli previsti per l'architettura maggiore (Carbonara, 2014). Inoltre, se per gli edifici tutelati la normativa dà preminenza al ruolo di controllo delle Soprintendenze, d'altro canto molteplici stimoli, in particolare i sistemi d'incentivazione fiscale, si aggiungono alla prospettiva di minori consumi e maggior benessere che accompagna l'efficienza energetica¹⁹. Peraltro per le amministrazioni pubbliche, le cui sedi sono spesso costituite da edifici monumentali e per le quali possono configurarsi risparmi economici consistenti, un ulteriore stimolo è costituito dal ruolo esemplare che la direttiva 2012/27/UE attribuisce agli enti pubblici nel raggiungimento degli obiettivi comunitari di efficienza energetica.

Molti studi, dunque, propongono d'intendere la deroga prevista dalla normativa, anziché come una soluzione, bensì come uno strumento per adottare anche dal punto di vista energetico un approccio ormai consolidato in ambito strutturale e di accessibilità, che mira al miglioramento dell'edificio, cioè ad accrescerne il più possibile le prestazioni nel rispetto dei caratteri propri della costruzione storica, senza necessariamente adeguarlo ai requisiti normativi²⁰. Tale approccio consentirebbe infatti di favorire l'impiego di tecniche oggi disponibili che risultino compatibili con la costruzione storica e integrabili nelle pratiche del recupero, ma anche di promuovere e indirizzare la ricerca e l'innovazione in quegli ambiti nei quali il miglioramento prestazionale appare impervio, come la generazione di energia da fonti rinnovabili e gli interventi sull'involucro. In quest'ottica, nuovamente, l'efficienza energetica dev'essere intesa come parte di un quadro più ampio, che coinvolge l'impatto ambientale dell'intervento, i suoi effetti sulle condizioni di benessere negli spazi interni e il rispetto dei principi della conservazione, quindi la compatibilità materica e formale dell'intervento con i caratteri propri dell'edificio.

Come evidenziano i documenti d'indirizzo progettuale e normativo recentemente sviluppati, fra i quali il sistema di valutazione GBC *Historic Building* (2015a), le linee guida per l'efficienza energetica degli edifici storici elaborate dall'AICARR (De Santoli, 2014), quelle conseguenti del Ministero dei Beni culturali (2015), il miglioramento energetico del costruito storico richiede un approccio fondato su molteplici criteri (Litti et al., 2013). Ne discende la necessità di sviluppare metodi interdisciplinari (Fouseki e Cassar, 2014) e applicare un approccio integrato (Carbonara, 2014) che, coinvolgendo tutte le figure interessate dal miglioramento dell'edificio, consenta d'individuare le soluzioni più opportune per conseguire un incremento ottimale delle prestazioni in modo compatibile con le peculiarità della costruzione.

In quest'ottica s'inserisce una recente proposta di norma tecnica internazionale, elaborata dal Comitato tecnico CEN/TC 346 "Conservation of cultural heritage" (prEN 16883:2015), volta a costituire delle linee guida per migliorare le prestazioni energetiche negli edifici d'interesse storico, architettonico e culturale. La norma propone una proce-

dura di lavoro mirata a valutare, dal punto di vista delle esigenze di tutela e in un'ottica di sostenibilità (ambientale, economica, sociale e culturale), l'impatto sull'edificio di possibili interventi volti ad accrescerne l'efficienza energetica, e suggerisce che tale procedura sia attuata da un gruppo multidisciplinare di esperti, in stretta relazione con le altre figure coinvolte nel processo (proprietari, utilizzatori, autorità preposte alla tutela). Come emerge anche da questa proposta di norma tecnica, la definizione di strategie d'intervento e linee d'indirizzo progettuale può conseguire l'obiettivo di una compatibilità del miglioramento energetico e ambientale con la conservazione del costruito storico solo se tiene conto dei caratteri specifici di questo. Ne discende la necessità del riferimento alla dimensione locale dell'architettura storica.

Note

¹ Il rapporto fu elaborato da un gruppo di analisti del *Massachusetts Institute of Technology* su commissione del *Club di Roma*.

² Negli anni seguenti la Convenzione, integrata da otto Protocolli, allarga il proprio campo d'azione alle sostanze che minacciano in modo più diretto la salute umana e gli ecosistemi (zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili, metalli pesanti, eccetera).

³ L'Organizzazione Mondiale della Sanità stimò che nel 1984 il 30% degli edifici, di nuova costruzione o ristrutturati, avesse una scarsa qualità ambientale interna (WHO, 1986).

⁴ Il sistema EMICODE è stato elaborato dalla GEV (Associazione per il controllo delle emissioni nei prodotti per l'installazione di pavimenti, negli adesivi e nei materiali da costruzione), fondata da alcune aziende di prodotti di fissaggio per pavimenti nel 1997 in Germania. Peraltro questo Paese, insieme alla Francia, ha introdotto precocemente dei limiti normativi al contenuto di VOC nei prodotti per l'edilizia.

⁵ A questi si aggiungono la *Convenzione sulla diversità biologica* (CBD), la *Dichiarazione dei principi per la gestione sostenibile delle foreste*, la *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici* (UNFCCC).

⁶ Infatti il principio di precauzione è incluso nella norma ISO 15392:2008 tra i principi da applicare per conseguire gli obiettivi di sostenibilità nel settore edile e più in generale nell'ambito delle costruzioni. Nella prospettiva di uno sviluppo sostenibile, che guardi alle conseguenze di lungo termine delle attività umane, il principio di precauzione pone alla base della valutazione dei rischi le conseguenze che possono derivare per le generazioni future e dunque, senza inibire l'innovazione, dovrebbe essere applicato all'adozione di nuove tecnologie o prodotti. Il principio di precauzione si accompagna alla gestione dei rischi, gestione che, secondo la norma, consiste in attività coordinate che comprendono la valutazione del rischio, il suo trattamento, l'accettazione e la comunicazione. Si veda a tal proposito anche Kibert (2013).

⁷ Si consulti a tal proposito il sito www.eur-lex.europa.eu.

⁸ La *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici*, volta alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, rimanda per la definizione di limiti obbligatori ad aggiornamenti, detti *Protocolli della Convenzione*. Il più noto di questi è quello sottoscritto nel 1997 a Kyoto, che prevedeva che entro il 2012 le emissioni di gas a effetto serra in atmosfera fossero ridotte per i Paesi industrializzati di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990 (8% per l'Unione Europea). Le forti resistenze alla sua attuazione sono evidenziate dall'acceso dibattito internazionale che ha accompagnato l'estensione dei termini del *Protocollo* sino al 2020, accolta dall'Unione Europea.

⁹ Il requisito su "igiene, salute e ambiente" riguarda, fra l'altro, lo sviluppo di gas tossici, le emissioni di sostanze pericolose, composti organici volatili, gas a effetto serra, radiazioni pericolose, i problemi connessi all'umidità. Peraltro si richiama a tal proposito il Regolamento (CE) 1907/2006 sulla gestione delle sostanze chimiche (REACH).

Nell'ambito del requisito sul "risparmio energetico e la ritenzione del calore", il regolamento prescrive che le opere di costruzione siano efficienti sotto il profilo energetico e che si adoperi quanta meno energia possibile durante la loro costruzione e demolizione.

Infine, per l'“uso sostenibile delle risorse naturali”, “le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione; la durabilità delle opere di costruzione; l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili” (Allegato I del Regolamento (UE) n. 305/2011).

Gli altri requisiti di base delle opere di costruzione, indicati dal Regolamento 305 del 2011, sono “resistenza meccanica e stabilità”, “sicurezza in caso di incendio”, “sicurezza e accessibilità nell'uso”, “protezione contro il rumore”.

¹⁰ Regole per sviluppare dichiarazioni ambientali per categorie di prodotto, relative a prodotti e servizi nel settore delle costruzioni, sono contenute inoltre nella norma UNI EN 15804:2012.

¹¹ Nell'ambito del sistema CasaClima è stato recentemente sviluppato un protocollo di valutazione, CasaClima R, relativo agli interventi volti al risanamento energetico del costruito esistente e al miglioramento del benessere ambientale interno.

¹² Il protocollo ITACA è stato elaborato dall'Istituto per l'Innovazione e la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale.

¹³ Per l'Italia le stime riportate in BPIE (2011) indicano che la percentuale del patrimonio residenziale esistente al 1960 è pari al 40% (in termini di superficie), ma questa non tiene conto delle costruzioni realizzate prima del 1950.

¹⁴ Il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 definisce “edifici a energia quasi zero” quelli, di nuova costruzione o esistenti, che rispettino: “tutti i requisiti previsti dalla lettera b), del comma 2, del paragrafo 3.3, determinati con i valori vigenti dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici” nonché “gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato 3, paragrafo 1, lettera c), del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28”.

¹⁵ La direttiva prevede che ciascuno Stato membro garantisca dal gennaio del 2014 che il 3% della superficie coperta utile totale degli edifici riscaldati o raffreddati di proprietà del governo centrale e da esso occupati sia ristrutturata ogni anno per rispettare almeno i requisiti minimi della 2010/31/UE. Ciascun Paese può estendere tale obbligo anche agli altri enti pubblici.

¹⁶ Fra le nuove costruzioni rientrano, accanto agli edifici per i quali il titolo abilitativo sia chiesto dopo l'entrata in vigore del D.M. 26.06.2015, anche le attività di demolizione e ricostruzione e quelle di ampliamento.

Le ristrutturazioni importanti sono invece distinte dalla norma in due livelli. Al “primo livello” afferiscono gli interventi di ristrutturazione che interessano l'involucro con un'incidenza superiore al 50% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e la ristrutturazione dell'impianto termico. Al “secondo livello” si riferiscono gli interventi con incidenza superiore al 25% che possono interessare l'impianto.

Delle “riqualificazioni energetiche” fanno parte gli interventi, sull'involucro e sugli impianti, non riconducibili ai due casi precedenti ma che abbiano comunque impatto sulla prestazione energetica dell'edificio: interventi sull'involucro che coinvolgono non più del 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio, la nuova installazione o la ristrutturazione di impianti di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, la sostituzione del generatore.

¹⁷ Tale impostazione è stata mantenuta nella revisione della direttiva (2010/31/UE), che al paragrafo 2 dell'articolo 4 recita: “Gli Stati membri possono decidere di non fissare o di non applicare i requisiti di cui al paragrafo 1 per le seguenti categorie edilizie: a) edifici ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro particolare valore architettonico o storico, nella misura in cui il rispetto di determinati requisiti minimi di prestazione energetica implichi un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto; b) edifici adibiti a luoghi di culto e allo svolgimento di attività religiose [...]”.

¹⁸ Ambrogio e Zuppiroli (2013) rintracciano le prime espressioni d'interesse della normativa italiana verso la relazione fra l'istanza energetica e il patrimonio culturale nel D.M. 10 settembre 2010 “Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili”, nel quale viene coinvolto direttamente il Ministero dei Beni Culturali.

¹⁹ Tuttavia alcuni autori, come sottolineano Fouseki e Cassar (2014), evidenziano le difficoltà che gli interventi per una maggior efficienza delle abitazioni incontrano, nonostante le incentivazioni economiche statali,

in vari Paesi europei e le attribuiscono allo scollamento fra le politiche di riqualificazione, che spesso guardano solo ad aspetti tecnici ed economici, e le esigenze e i comportamenti degli utenti.

²⁰ Questo approccio al miglioramento trova espressione nelle “Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008” (D.P.C.M. 9 febbraio 2011) e nelle “Linee guida per il superamento delle barriere architettoniche nei luoghi di interesse culturale” (D.M. 28 marzo 2008).

Bibliografia

Adams, C., Douglas-Jones, R., Green, A., Lewis, Q., Yarrow, T. (2014). Building with History: Exploring the Relationship between Heritage and Energy in Institutionally Managed Buildings. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 167-181.

Agbota, H. (2014). Anticipating the Unintended Consequences of the Decarbonisation of the Historic Built Environment in the UK. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 101-115.

Ambrogio, K., & Zuppiroli, M. (2013). *Energia e restauro: Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali*. Milano: Franco Angeli.

ANIT (Associazione Nazionale per l'isolamento Termico e acustico). (2013). *Linee guida per la progettazione con i protocolli di sostenibilità LEED e ITACA: Versione 1.3 - Gennaio 2013*. Milano: TEP srl.

ANIT. (2015). *Guida ANIT: Efficienza energetica e acustica degli edifici: Ottobre 2015*. Milano: TEP srl.

Berge, B. (2009). *The ecology of building materials. Second edition*. Oxford, Regno Unito: Architectural Press.

BPIE. (2011). *Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*. Da <http://bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>.

Camuffo, D. (2007). *Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali*. Milano: Mondadori Electa.

Carbonara, G. (2014). Energy Efficiency as a protection tool - Efficienza energetica come strumento di tutela. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

Casini, M. (2013). *Progettare l'efficienza degli edifici: Certificazione di sostenibilità energetica e ambientale* (seconda edizione). Roma: DEI Tipografia del Genio Civile.

CIB (Conseil International du Bâtiment). (1999). Agenda 21 on sustainable construction. *CIB Report Publication 237*. Rotterdam: CIB.

Colette, A. (a cura di). (2007). *Climate Change and World Heritage: Report on predicting and managing the impacts of climate change on World Heritage and Strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses* (World Heritage reports 22). Parigi: World Heritage Centre UNESCO. Da <http://whc.unesco.org/en/series/22/>.

Colette, A. (a cura di). (2009). *Case Studies on Climate Change and World Heritage*. Parigi: World Heritage Centre UNESCO. Da <http://whc.unesco.org/en/activities/473/>.

Crockford, D. (2014). Sustaining Our Heritage: The Way Forward for Energy-Efficient Historic Housing Stock. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 196-209.

De Santoli, L. (a cura di). (2014). *Efficienza energetica negli edifici storici*. Milano: Editoriale Delfino.

ENEA. (2015). *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2015*. Roma: ENEA. Da <http://www.enea.it/it/pubblicazioni/edizioni-enea/2015/rapporto-annuale-efficienza-energetica-2015>

Fabbri, K. (2013). Energy incidence of historic building: Leaving no stone unturned. *Journal of Cultural Heritage*, 14S, e25-e27.

Fouseki, K., & Cassar, M. (2014). Editorial: Energy Efficiency in Heritage Buildings - Future Challenges and Research Needs. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 95-100.

Franzen, C., & Troi, A. (2013). *3encult D 2.2=D 3.2 Position Paper on criteria regarding the assessment of energy efficiency measures regarding their compatibility with conservation issues*. 3encult. Da http://www.3encult.eu/en/project/workpackages/builtheritageanalysis/Documents/3ENCULT_2.2=3.2.pdf

GBC (Green Building Council) Italia. (2015a). *GBC Historic Building: Sistema di verifica GBC Historic Building® - Versione breve ad uso pubblico e divulgativo - Per il restauro e la riqualificazione degli edifici sto-*

rici (edizione 2015). GBC Italia. Da <http://www.gbccitalia.org/risorse/169?locale=it>.

GBC (Green Building Council) Italia. (2015b). *Green Building Nuove costruzioni e ristrutturazioni* (edizione 2009, aggiornato al 30 giugno 2015). GBC Italia. Da <http://www.gbccitalia.org/risorse/90?locale=it>.

Kibert, C. J. (2013). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery* (terza edizione). Hoboken, Stati Uniti: John Wiley & Sons, Inc.

Leissner, J., Kaiser, U., & Kilian, R. (2014). *Climate for Culture: Built cultural heritage in times of climate change*. Lipsia, Germania: Fraunhofer MOEZ.

Litti, G., Audenaert, A., & Braet, J. (2013). Energy retrofitting in architectural heritage, possible risks due to the missing of a specific legislative and methodological protocol. In *The European Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2013: Official Conference Proceedings. Convegno tenuto a Brighton, Regno Unito, 4-7 luglio 2013*. Giappone: IAFOR.

Maroni, M., Seifert, B., & Lindvall, T. (a cura di) (1995). *Air quality monographs vol. 3. Indoor Air Quality. A comprehensive reference book*. Amsterdam: Elsevier.

Martines, G. (2014). La sostenibilità dell'adeguamento e del miglioramento antisismico nel cantiere di restauro. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 95-101). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Mazzarella, L. (2014). Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view - Recupero energetico degli edifici storici e esistenti. Il punto di vista legislativo-normativo. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

Mazzarella, L. (2015). Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. *Energy and Buildings*, 95, 23-31.

Olgay, V. (2013). *Progettare con il clima: Un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico* (nuova edizione). Roma: Franco Muzzio editore.

Pacchi, V. (2014). Historic Buildings and Energy Efficiency. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 210-225.

Romeo, E. (2014). Sostenibilità culturale e d'uso nel restauro archeologico: dalla Commissione Franceschini alla Carta di Siracusa. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 83-94). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Stuart, C. M. (2014). Managing or Driving Change? Establishing Consensus of Opinion on Improving the Energy Efficiency of Historic Buildings. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 182-195.

Troi, A. (2011). Historic buildings and city centres - the potential impact of conservation compatible energy refurbishment on climate protection and living conditions. In *Energy Management in Cultural Heritage. Convegno tenuto a Dubrovnik, Croazia, 6-8 aprile 2011*. Da http://www.3encult.eu/en/deliverables/Documents/2011_EM_Troi_Impact.pdf.

UNI. (2015a). UNI/PdR 13.0: 2015 Prassi di riferimento. Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità: Inquadramento generale e principi metodologici. UNI.

UNI. (2015b). UNI/PdR 13.1:2015 Prassi di riferimento. Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità: Edifici residenziali. UNI.

Ventimiglia, G. M. (2014). Birth and affirmation of the principle of "minimal intervention" in the practice of restoration in the United Kingdom (19th c.). In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 73-81). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Vitiello, M. (2014). Responsabilità e interdipendenza delle azioni conservative: Le parole chiave per una possibile definizione di "restauro sostenibile". In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 13-22). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

WHO (World Health Organization). (1986). Indoor air quality research. Report on a WHO meeting. Stockholm 27-31 August 1984. *EURO Reports and Studies 103*. Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe.

CAPITOLO 2

La qualità energetica e ambientale dell'architettura storica: percorsi di ricerca *Energy and environmental quality for the historic architecture: research paths*

ABSTRACT - A wide proportion of the researches concerning the energy and environmental improvement of historic buildings focuses on areas where the heating demand prevails. However, in the last years more attention has been given to the Mediterranean context and to the energy need for cooling.

The research paths depicted in this chapter show the richness and variety of the approaches followed by the current studies on this topic. At the scale of building components, to improve the envelope performance several researches propose innovative materials and techniques, or the adaptations of those used for new and recent constructions. Other studies focus on the possibilities to use more efficient systems and renewable energy sources in the historic architecture, according to their effect both on building conservation and appearance.

At the building scale, case studies for vernacular and monumental architecture are examined in order to understand the thermal and hygrometric features of the historic construction, the reliability of software models, the performance improvement and the risks related to measures on the building envelope and systems. The focus on specific topics and the peculiarities of each historic construction make these researches contribute to a general knowledge about relevant and common uncertainties and issues. Furthermore, in their entirety these studies constitute a list of practices, whose visual and comfort effects can be assessed and long-term consequences monitored.

Some researches investigate building stocks, which can be a historic centre but also a regional or national architectural heritage. In the first case, the aim is the finding of refurbishment solutions suitable to the features of the analysed stock. An example are damaged or abandoned villages, where the structural and functional intervention can be an opportunity for the enhancement of the energy performance. For wider building stocks the main outcome consists of methodologies whose purpose is the development of local strategies based on a rough assessment of current energy performance and improvement potentialities.

Both at the building level and at the scale of their components, the application of

the Life Cycle Assessment is proposed to consider all the environmental impacts of conservation, restoration and energy enhancement. Besides, the attention to the several aspects of sustainability is evident in guidelines and rating systems proposed for a general application, regardless of the local peculiarities of historic buildings. The purposes of these protocols are helping the design process of energy improvement and assessing the level of sustainability in the restoration and maintenance of the architectural heritage.

Despite the theme of energy efficiency in historic buildings is quite recent, the state of the art shows a complex and prolific picture. Besides the unreliability of several computer programs to simulate the energy performance of historic constructions, it indicates a general lack of information about the thermal and hygrometric behaviour of traditional materials and components. Therefore, current researches confirm that also for the topic of energy efficiency the historic architecture requires a reference to the features of the local context and to the peculiarities of each building.

Il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'architettura storica è da alcuni anni oggetto di un crescente interesse scientifico, che, come per gli edifici recenti e di nuova costruzione, ha coinvolto dapprima le aree con un fabbisogno prevalente di riscaldamento, nelle quali tuttora si concentra la parte più consistente degli studi, ma si sta progressivamente estendendo anche alle aree a clima mediterraneo.

La varietà dei temi affrontati e degli approcci seguiti da un numero crescente di ricerche è ampia. Basti pensare ai numerosi progetti che, nei *Programmi Quadro di Ricerca* dell'Unione Europea, riguardano il tema dell'efficienza energetica del costruito storico. Si citano ad esempio 3ENCULT (*Efficient Energy for EU Cultural Heritage*), CETIEB (*Cost-Effective Tools for Better Indoor Environment in Retrofitted Energy Efficient Buildings*), *Climate for Culture*, EFFESUS (*Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability*), MESSIB (*Multi-source Energy Storage Systems Integrated in Buildings*), SMooHS (*Smart Monitoring of Historic Structures*), SECHURBA (*Sustainable Energy Communities in Historic Urban Areas*), cui si aggiungono progetti di ambito locale come *Alphouse* (riguardante il recupero degli edifici alpini) e *Co₂olBricks* (relativo all'area baltica). Numerosi sono anche i progetti nazionali, come *Spara och Bevara* in Svezia, SuRHIB in Svizzera, BATAN (*BATiment ANcien*), ATHEBA (*Amélioration THERmique des Bâtiments Ancien*) e *Tuffeau* in Francia.

Pertanto, gli aspetti più inerenti all'economia del presente studio, relativi alla caratterizzazione termofisica dei materiali, alle tecniche di miglioramento energetico, agli studi alla scala urbana, sono trattati nel prosieguo della tesi (cfr. capp. 3-6). Qui si delineano invece sinteticamente i principali percorsi di ricerca che emergono da questo vasto panorama di studi.

Alcune di queste direzioni sono già evidenti nelle questioni sollevate dalle linee guida normative che, in diversi Paesi europei, sono state elaborate nel corso degli anni nel tentativo di coniugare la conservazione dell'architettura storica con il miglioramento delle sue prestazioni energetiche. A tal proposito si rilevano, anche per la loro precocità (Ambrogio e Zuppiroli, 2013), le linee guida predisposte in Inghilterra da *English Heritage* (English Heritage, 2012) a breve distanza dall'entrata in vigore delle disposizioni derivanti dalla direttiva 2002/91/CE. Queste linee d'indirizzo, pur tenendo conto dei differenti gradi di tutela cui la normativa britannica sottopone gli edifici d'interesse culturale, pongono l'attenzione anche sul particolare comportamento termico e igrometrico della costruzione tradizionale, che accomuna le architetture auliche e quelle elenali.

Evidenziando come già interventi puntuali e poco invasivi possano produrre effetti significativi in termini di benessere interno e consumo energetico, il documento sottolinea la necessità di accostare alla sensibilità verso il valore culturale di tali edifici una conoscenza accurata delle loro prestazioni. Ne sono testimonianza i numerosi documenti che, a corredo delle linee guida, *English Heritage* ha elaborato per fornire, anziché interventi codificati, dei criteri operativi per un miglioramento compatibile dei componenti tecnici d'involucro¹.

Più recentemente anche in Italia sono state sviluppate delle linee guida per l'efficienza energetica dell'architettura storica. Il Ministero per i Beni e le Attività Culturali ha infatti proposto delle "Linee d'indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale" (28 ottobre 2015), connesse a quelle elaborate dall'AICARR (*Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione*) (De Santoli et al., 2014). Dando maggiore attenzione, rispetto a queste, alle questioni concernenti gli interventi sull'involucro, le Linee Guida si rivolgono sia ai professionisti sia alle Soprintendenze, per fornire una base conoscitiva comune sul comportamento dell'involucro edilizio storico, sulle procedure e i livelli della diagnosi energetica, sugli interventi disponibili. In tal modo, esse intendono costituire al contempo uno strumento d'indirizzo progettuale e di verifica della compatibilità degli interventi.

Le indicazioni di questi documenti lasciano emergere, accanto alla stretta connessione fra consumi energetici, benessere degli utenti e conservazione del patrimonio culturale, la necessità di una conoscenza approfondita delle proprietà termiche e igrometriche dei materiali e dei componenti della tradizione costruttiva storica, l'opportunità di elaborare protocolli d'indagine che consentano di superare le difficoltà connesse alle disuniformità del costruito storico, la definizione di criteri di scelta degli interventi migliorativi basati, oltre che sull'esigenza di conservazione dell'edificio, anche sulla loro valutazione in termini di compatibilità tecnica, fattibilità economica e impatto ambientale.

2.1 Linee guida e sistemi di valutazione della sostenibilità

La necessità di un approccio multidisciplinare al miglioramento energetico dell'architettura storica, fondato sulla considerazione dei numerosi aspetti ambientali, economici e culturali che con esso s'intrecciano (cfr. par. 1.5), trova evidenza nelle Linee Guida "La qualità delle prestazioni energetico-ambientali nella manutenzione dell'architettura storica", elaborate nella Regione Veneto nell'ambito del progetto A.T.T.E.S.S. (2010). Questo, anche nell'ottica di una possibile valutazione delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici storici, esamina le principali aree tematiche del protocollo ITACA, quali il consumo di risorse energetiche, la gestione dell'acqua e dei materiali, il benessere visivo e acustico, alla luce degli interventi che sull'architettura storica sono applicabili secondo le disposizioni di legge per essa vigenti (il Codice dei Beni culturali, D. Lgs. 42 del 2004, o il solo Testo Unico dell'Edilizia, D.P.R. 380 del 2001). Al contempo, le lega alla necessaria conoscenza dei caratteri propri dell'architettura storica locale. Analizzando sia le attività di restauro sia quelle di manutenzione (ordinaria e straordinaria), il progetto identifica soprattutto in queste ultime l'opportunità di migliorare, in modo anche rilevante, le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio. In questo senso si pone in stretta continuità sia con le linee guida prima indicate, sia con l'importanza che il dibattito scientifico attribuisce alla manutenzione programmata nel perseguire obiettivi di sostenibilità in ambito edile. Pur nei limiti evidenziati da alcuni autori (Ambrogio e Zuppiroli, 2013), il progetto A.T.T.E.S.S. pone attenzione alla necessità di in-

tendere il miglioramento energetico come un aspetto della più complessiva qualità ambientale interna della costruzione storica. Al contempo evidenzia l'opportunità di applicare anche agli interventi sul patrimonio storico sistemi di analisi dell'impatto che essi producono in termini ambientali ma anche sociali.

In effetti la valutazione degli interventi di recupero e dell'utilizzo degli edifici storici sono oggetto di discussione in ambito scientifico. Da un lato, si sottolinea il rischio che l'applicazione di tali approcci si traduca nella promozione di pratiche d'intervento poco attente alle specificità della singola costruzione (De Vita, 2009) e si evidenzia la difficoltà di definire una struttura di valutazione effettivamente oggettiva (Cinieri, 2014); dall'altro lato, è notevole l'interesse a dimostrare le possibilità di un uso e di una gestione sostenibili del costruito storico, anche in raffronto a quello recente. In quest'ottica è significativa la certificazione della Ca' Foscari di Venezia (2013) secondo il protocollo per edifici esistenti LEED *Existing Building: Operation and Maintenance* (versione 2009)².

Recentemente il *Green Building Council Italia*³ ha elaborato, sulla base del sistema internazionale LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), il protocollo *GBC Historic Building* (GBC Italia, 2015), volto a certificare la sostenibilità di interventi di restauro, recupero e ristrutturazione⁴ di edifici civili (ad uso commerciale e istituzionale) che costituiscano "testimonianza materiale avente valore di civiltà". Nel protocollo si considerano tali le costruzioni realizzate, prima del 1945, con un "processo edilizio pre-industriale" e con materiali e tecniche propri della tradizione storica locale.

La struttura del protocollo, che esplicitamente si propone di valutare gli interventi sul costruito storico sulla base di una conoscenza accurata della fabbrica, mostra chiari richiami alle prassi consolidate del restauro. Spicca, a tal proposito, l'inserimento di un'ulteriore categoria ambientale, "Valenza storica", il cui peso nella valutazione complessiva è seconda alla sola area "Energia e Atmosfera" (cfr. tab. 2.1).

AREA TEMATICA	PUNTI ASSEGNABILI	PESO DELL'AREA
Valenza storica	20	18%
Sostenibilità del Sito	13	12%
Gestione delle Acque	8	7%
Energia e Atmosfera	29	26%
Materiali e Risorse	14	13%
Qualità Ambientale Interna	16	15%
Innovazione nella Progettazione	6	5%
Priorità Regionale	4	4%

Tabella 2.1. Aree tematiche del protocollo *GBC Historic Building* (Edizione 2015) e il relativo peso sulla valutazione complessiva (GBC, 2015).

L'area tematica "Valenza storica" richiede come prerequisito obbligatorio per la certificazione lo svolgimento sull'edificio di indagini preliminari, volte a conoscerne le caratteristiche materiche e costruttive, l'evoluzione storica, i degradi e i dissesti ma anche lo schema di funzionamento degli impianti. Accanto ad aspetti peculiari del recupero del costruito storico, come la compatibilità chimico-fisica e strutturale degli interventi, e a temi tipici del restauro, come la reversibilità, il protocollo promuove, attraverso quest'area tematica, indagini conoscitive avanzate in campo energetico (soprattutto analisi termografiche e misure di conduttanza termica), la riduzione dell'impatto ambientale del cantiere di restauro⁵, la predisposizione di un piano di manutenzione programmata dell'edificio (cfr. par. 1.4).

La distribuzione dei pesi assegnati alle aree tematiche mostra la preminenza attribuita all'aspetto energetico e alla qualità ambientale interna, con la richiesta di prestazioni energetiche minime (Energia e Ambiente, prerequisito 2) e la loro ottimizzazione, l'utilizzo di prodotti a basse emissioni di contaminanti e il controllo della concentrazione di sostanze inquinanti in atmosfera. Al contempo, il protocollo GBC *Historic Building* coinvolge anche aspetti, come la riciclabilità dei materiali e la gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione, che guardano a tutti gli impatti ambientali connessi alle attività edili di recupero del costruito storico.

2.2 La valutazione del ciclo di vita

Nell'area tematica "Materiali e Risorse" del protocollo GBC *Historic Building*, il credito relativo all'"ottimizzazione ambientale dei prodotti" mira a favorire l'impiego di materiali e prodotti dei quali sia noto l'impatto sul ciclo di vita dell'edificio; a tal fine, dunque, è necessario ricorrere a dichiarazioni ambientali (EPD) o alla valutazione del ciclo di vita (LCA).

In quest'ottica è interessante il Progetto di Ricerca d'Interesse Nazionale (PRIN) BHIMM ("Modellazione e gestione delle informazioni per il patrimonio edilizio esistente. *Built Heritage Information Modeling/Management*") (Musso e Franco, 2014). Questo propone l'applicazione alla conservazione e alla gestione delle costruzioni storiche di una metodologia fondata sull'utilizzo del *Building Information Modelling* (BIM), attraverso il quale gestire il ciclo di vita degli interventi praticati su tale patrimonio. Il progetto, infatti, mira a definire anche un quadro di informazioni sulle prestazioni ambientali nel ciclo di vita delle tecniche adottate per la conservazione e riqualificazione degli edifici esistenti, che possano essere adoperate sia per la certificazione ambientale degli edifici sia per orientare le scelte tecniche di progetto (Paleari, Lavagna, Campioli e De Angelis 2014).

I caratteri specifici del costruito storico, soprattutto di quello monumentale, indirizzano spesso in modo univoco verso l'adozione di determinate tecniche d'intervento; in alcuni casi, come sottolineano Paleari et al. (2014), la scelta fra tecniche alternative ed egualmente compatibili potrebbe essere guidata dal loro "profilo ambientale". In quest'ottica gli autori, concentrandosi sugli interventi volti alla conservazione delle superfici murarie nell'ambito di operazioni di restauro o manutenzione, hanno analizzato l'impatto ambientale di tredici tecniche, raggruppate in quattro categorie (pulitura, consolidamento, prote-

zione, e altri interventi che includono il risarcimento dei giunti di malta, l'integrazione dell'intonaco esistente, la rimozione di rivestimenti plastici).

La considerazione dell'impatto ambientale degli interventi è considerata, in ambito scientifico, come un'utile guida per il miglioramento energetico del patrimonio storico (Bison et al., 2014), in particolare per l'architettura diffusa, nella quale il minor pregio artistico lascia maggiore spazio per seguire criteri d'uso e gestione improntati a una riduzione degli effetti sull'ambiente. Ovviamente, nell'applicazione all'architettura storica della valutazione del ciclo di vita, la fase di dismissione del fabbricato viene spostata virtualmente all'infinito (Cinieri, 2014). Per il patrimonio architettonico tradizionale, l'utilità di questo metodo di valutazione è anche individuata nella capacità di evidenziare la convenienza nell'investimento di riqualificazione e recupero conservativo e di fornire potenzialmente agli enti pubblici una guida per elaborare politiche finanziarie che favoriscano pratiche edilizie effettivamente sostenibili non solo per la maggior efficienza energetica, ma per il bilancio complessivo dei loro impatti ambientali, economici e sociali (Cinieri, 2014). Tuttavia, la difficoltà a ottenere dati accurati sui processi produttivi degli elementi utilizzati nella costruzione degli edifici, la scarsità di informazioni per la caratterizzazione termofisica dei materiali storici (che ostacola la valutazione dei consumi energetici in fase di gestione), insieme a dati spesso poco attendibili sulla durabilità di materiali e componenti, ad oggi frenano l'applicazione della metodologia LCA nel campo del restauro e del recupero (Bison et al., 2014; Cinieri, 2014).

2.3 Indagini conoscitive e modellazioni

La necessità di una conoscenza accurata delle prestazioni energetiche degli edifici storici, necessaria anche per la valutazione del ciclo di vita (Cinieri, 2014), fa della diagnostica un aspetto preponderante nelle ricerche sull'efficienza energetica del costruito storico. Sulle caratteristiche termiche e igrometriche di tali edifici, infatti, sono indispensabili ampi approfondimenti (cfr. cap. 3) che, ad esempio attraverso la predisposizione di raccolte di dati di riferimento locale (A.T.T.E.S.S., 2010), consentano di valutare la praticabilità e l'efficacia di possibili interventi di miglioramento.

Numerose ricerche, dunque, si concentrano sulla definizione di valori affidabili per le caratteristiche dei componenti d'involucro, in particolare della trasmittanza delle muraure e della permeabilità all'aria degli infissi e delle connessioni. I dati normativi, seppur rivolti in alcuni casi anche al costruito storico, fanno riferimento essenzialmente all'edificato recente (cfr. cap. 3). Estese indagini per la caratterizzazione dei materiali, soprattutto delle murature, connotano ad esempio le ricerche condotte in Gran Bretagna da *English Heritage*, *Historic Scotland* e dalla *Society for the Protection of Ancient Buildings* (SPAB) (cfr. cap. 4) o quelle svolte in Francia nell'ambito del progetto *Tuffeau* (Stephan e Caucheteux, 2014). Quest'ultimo, nell'ottica della riqualificazione energetica degli edifici storici francesi costruiti con pietra calcarea, ne ha analizzato nel dettaglio il fabbisogno energetico attuale e ha valutato l'efficacia di possibili strategie di miglora-

mento attraverso un'estesa campagna di misure svolte su edifici, su campioni lapidei ma anche su ambienti di prova realizzati con i materiali indagati.

Al contempo le difficoltà connesse a una diagnosi energetica esaustiva degli edifici storici spingono allo studio delle potenzialità e dei limiti connessi alle varie tecniche d'indagine e alla definizione di tecniche di rilevazione e protocolli di analisi, anche di carattere speditivo. In particolare, vengono studiate le possibilità d'impiego di numerose indagini strumentali, che oltre a quelle più classicamente legate alla diagnosi energetica includono anche prove come quelle soniche e radar, per conseguire una conoscenza approfondita della fabbrica storica, e del suo comportamento termico e igrometrico, senza ricorrere a procedure d'indagine di tipo distruttivo (Litti, Khoshdel, Audenaert e Braet, 2015).

Appare significativo, a tal proposito, il progetto europeo 3ENCULT, nel quale l'accurata diagnosi di otto casi di studio ha costituito l'occasione per ampliare in modo consistente la base delle esperienze scientifiche in questo campo. In essi, le indagini termografiche, di conduttanza termica e di tenuta all'aria sono corredate anche da quelle relative alle condizioni igrometriche e luminose interne⁶.

Il miglioramento energetico di un edificio storico, infatti, è strettamente correlato al benessere delle persone e al mantenimento di condizioni termiche e igrometriche che garantiscano la conservazione del bene culturale, esigenze queste spesso conflittuali. A tal proposito è molto interessante l'approccio seguito nel progetto di ricerca comunitario *Climate for Culture* (Leissner, Kaiser e Kilian, 2014), la cui principale innovazione consiste nell'aver combinato la modellazione del clima esterno con quella dell'edificio. In tal modo è possibile valutare l'influenza del cambiamento climatico sulle condizioni interne delle costruzioni storiche e dunque sui rischi di degrado; al contempo, si può prevedere il futuro fabbisogno energetico connesso al controllo dell'ambiente interno degli edifici.

Si rileva infine come la stessa modellazione del comportamento termico e igrometrico del costruito storico sia oggetto di numerosi sforzi scientifici. Infatti, se da un lato è necessario riferirsi a programmi di simulazione dinamica per tener conto dei benefici "passivi" del costruito storico e soprattutto del suo equilibrio igrometrico, dall'altro questi strumenti richiedono un numero consistente di informazioni, che, facilmente ricavabili dalle schede di prodotto per gli edifici di nuova costruzione, sono invece difficilmente quantificabili per l'architettura storica (Lucchi e Pracchi, 2013). Se dunque alcuni autori (Leissner et al., 2014) evidenziano che la modellazione dettagliata degli scambi di calore e vapore acqueo attraverso i componenti è possibile solo attraverso pochi programmi informatici, altri propongono la combinazione di vari strumenti di calcolo per adattarne i vantaggi alle particolari caratteristiche del costruito storico (Widström, 2012).

2.4 Interventi e criteri di scelta

L'accrescimento delle prestazioni termiche degli edifici storici pone problemi di compatibilità sia formale sia fisica con la costruzione tradizionale, caratterizzata da un comportamento termico e igrometrico ben diverso da quello dell'edificato recente. Non sono

pochi i casi riportati in letteratura di alterazioni profonde di architetture storiche, causate da interventi volti ad accrescerne l'efficienza energetica (si citano ad esempio Litti, Audenaert e Braet, 2013; Ambrogio e Zuppiroli, 2013).

Lo studio di particolari soluzioni impiantistiche o di tecniche d'intervento sull'involucro sono parte costante dei principali progetti europei che si occupano dell'efficienza energetica degli edifici storici, che spesso ne verificano l'applicazione e le prestazioni sugli edifici adoperati come casi di studio. È ad esempio il caso del progetto 3ENCULT, che ha indagato le prestazioni, fra gli altri, di sistemi impiantistici e di serramenti lignei ad alte prestazioni, nonché del progetto EFFESUS, nel quale, sfruttando le variegate peculiarità ambientali dei casi di studio (costituiti in questo caso da comparti di edilizia storica, *historic districts*), si analizzano le prestazioni di malte d'isolamento termico, di sistemi intelligenti di gestione climatica interna, di sistemi d'isolamento per iniezione mediante aerogel, di rivestimenti riflettenti (Pockelé, Gandini, Bernardi e Rodriguez-Maribona, 2014).

Raccolte degli interventi disponibili per l'incremento delle prestazioni degli impianti e dell'involucro sono state curate, ad esempio, nelle citate "Linee d'indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale"; altre, volte principalmente alle esigenze delle aree a prevalente fabbisogno invernale, sono state elaborate nei progetti 3ENCULT (Troi e Bastian, 2014) e *Co₂olBricks* (Co₂olBricks, 2013).

Come evidenziato (cfr. par. 1.5), le difficoltà nell'individuare soluzioni compatibili con i caratteri del costruito storico discendono dai molteplici aspetti che devono indirizzare tale scelta. Boriani, Giambruno e Garzulino (2011), ad esempio, hanno proposto delle "schede tecniche d'intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio", che analizzano i principali interventi sull'involucro opaco e trasparente alla luce della loro efficacia (in termini d'incremento delle prestazioni energetiche), della durabilità, dei costi economici e della compatibilità con gli eventuali vincoli di tutela. Altri autori, come Broström et al. (2014), propongono invece procedimenti multidisciplinari che, per successive iterazioni, permettano d'individuare, fra le numerose soluzioni possibili, quelle utili a raggiungere gli obiettivi di efficienza energetica prefissati; e, fra queste, quelle accettabili da un punto di vista economico e soprattutto ammissibili rispetto alle esigenze della conservazione (cfr. par. 6.2).

Alcuni studi si concentrano sull'elaborazione di criteri d'indirizzo specifici per determinate modalità d'intervento. È, ad esempio, il caso del progetto svizzero SuRHiB, che propone linee guida per l'integrazione della tecnologia fotovoltaica anche nel costruito storico (CCEM, 2012; p. 53). Strumenti di supporto decisionale, rivolti alle amministrazioni nazionali e locali per la definizione di politiche d'intervento e strategie di finanziamento, ai progettisti per guidare le scelte progettuali, ma anche ai privati per valutare costi e benefici degli interventi di riqualificazione, sono parte integrante e spesso fulcro di molte delle ricerche comunitarie. Esempio significativo è quello del già citato progetto EFFESUS, che ha come obiettivo lo sviluppo di un "Sistema di Supporto Decisionale" (DSS); questo, costituito da un programma informatico corredato di un *database* di tecniche di miglioramento energetico, è volto a guidare l'individuazione delle soluzioni più opportune sulla

base delle caratteristiche specifiche dell'architettura storica locale, analizzate per mezzo di un metodo di categorizzazione (cfr. cap. 6).

Infine, appare esemplificativo del complesso intreccio di aspetti coinvolti nell'accrescimento dell'efficienza energetica dell'architettura storica lo strumento informativo predisposto dalla *Sustainable Traditional Buildings Alliance* (STBA), detto *Responsible Retrofit Guidance Wheel* o *STBAWheel*⁷, che, facendo specifico riferimento alla normativa di tutela inglese, esamina gli interventi di miglioramento sull'involucro e sugli impianti e ne mostra le reciproche connessioni⁸.

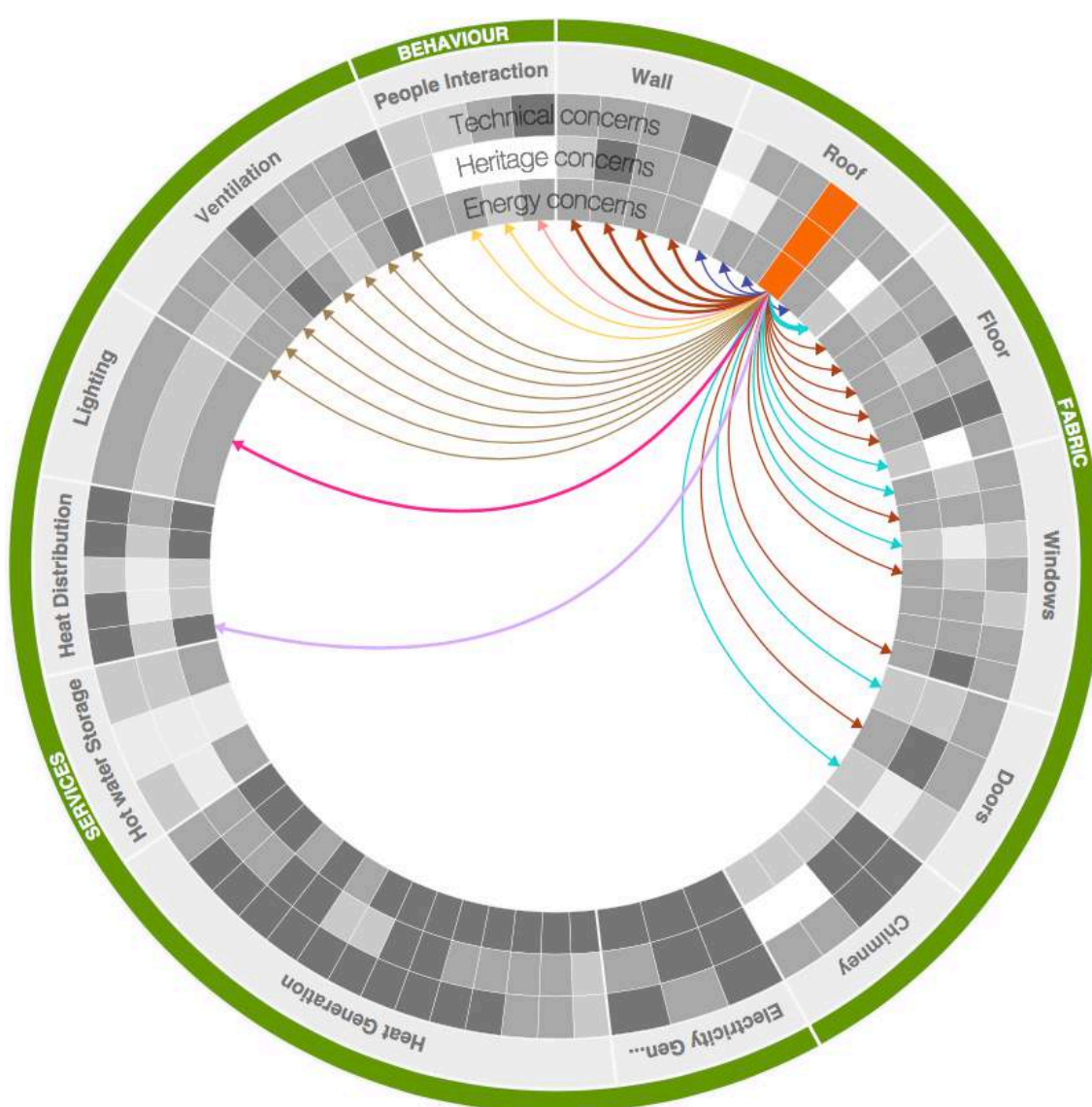


Figura 2.1. *Responsible Retrofit Guidance Wheel* elaborata dalla *Sustainable Traditional Buildings Alliance* (STBA). Da <http://responsible-retrofit.org/wheel/>.

2.5 Scala di ricerca: da singole architetture a comparti edilizi

Anche dal punto di vista del miglioramento energetico, è necessario far riferimento ai caratteri specifici della singola costruzione per individuare soluzioni che, oltre ad essere efficaci dal punto di vista prestazionale, siano soprattutto compatibili con la conservazione dei caratteri formali e materiali dell'architettura storica. Da questo punto di vista possono essere analizzati i numerosi casi di studio rintracciabili in letteratura, ad esempio quelli già citati del progetto 3ENCULT. Proprio un confronto fra questo ed EFFESUS, che si rivolge invece a comparti di edilizia storica, evidenzia come ai molteplici temi, in cui l'efficienza energetica del costruito storico si ramifica, si aggiunga, come per l'edificato recente, il ricorso a scale differenti di studio.

Come si discuterà in dettaglio nel capitolo 6, lo studio alla scala urbana è volto in alcuni casi a coniugare il miglioramento energetico con il recupero edilizio di centri abbandonati o fortemente danneggiati da eventi naturali (quali i sismi). In genere, tuttavia, è volto a definire un quadro generale di informazioni che consentano di avviare strategie d'intervento o di finanziamento a scala locale o nazionale (Ambrogio e Zuppiroli, 2013). È, ad esempio, il caso del progetto francese BATAN, volto allo studio dei caratteri principali del patrimonio storico nazionale e nell'ottica del suo miglioramento energetico, o del progetto EFFESUS, che, come già accennato, pone lo studio dei caratteri ricorrenti di comparti omogenei di edifici storici (*historic districts*) alla base dello sviluppo di uno strumento di "supporto decisionale" volto all'individuazione di soluzioni compatibili di miglioramento energetico dell'architettura storica.

D'altro canto, l'esame di singoli casi di studio, di cui la letteratura scientifica è molto ricca, contribuisce a creare un repertorio di pratiche e di esperienze delle quali un progetto di recupero attento all'istanza energetica può beneficiare. È in quest'ottica che l'ente scozzese *Historic Scotland* ha avviato nel 2012 la pubblicazione dei resoconti di alcuni interventi di riqualificazione, generalmente condotti ricorrendo a misure innovative di incremento prestazionale (*Refurbishment Case Studies*, cfr. cap. 5)⁹. Questi documenti mirano esplicitamente (Historic Scotland, 2012) a mostrare una panoramica di possibili interventi che, anche se non direttamente applicabili al caso specifico di altre costruzioni, possano costituire esempi di un approccio compatibile al miglioramento energetico dell'architettura storica.

Note

¹ Tali guide trattano il miglioramento prestazionale degli infissi, l'isolamento delle coperture, delle chiusure contro terra, delle canne fumarie, di diverse tipologie costruttive di pareti. Sono consultabili al sito di *Historic England* (denominazione attuale di *English Heritage*), <http://www.historicengland.org.uk/>.

² Si consulti a tal proposito il sito <http://www.gbcitalia.org/progetti/135?locale=it>.

³ Il *Green Building Council* Italia (GBC) gestisce per l'Italia il sistema di valutazione LEED.

⁴ Il protocollo infatti si rivolge, oltre che agli interventi di restauro e recupero, anche alle "ristrutturazioni importanti", intese come interventi "che coinvolgono elementi rilevanti degli impianti di climatizzazione e il rinnovo o la riorganizzazione funzionale degli spazi interni". Non si applica, invece, a interventi di carattere minore né a quelli che interessino un edificio solo in parte.

⁵ Viene indicata a tal fine la predisposizione di un "Piano per l'uso di tecniche di restauro sostenibile", volto in particolare a ridurre l'uso in cantiere di risorse energetiche non rinnovabili e a garantire il risparmio idrico, in particolare per quanto concerne l'uso dell'acqua piovana, delle acque reflue e di quelle connesse alla lavorazione degli inerti. A ciò si aggiunge, peraltro, il prerequisito dell'area tematica "Sostenibilità del Sito" in merito alla prevenzione dell'inquinamento da attività di cantiere.

⁶ Una ricca documentazione è disponibile nel sito del progetto di ricerca, <http://www.3encult.eu>.

⁷ Si consultino a tal proposito i siti <http://stbauk.org> e <http://responsible-retrofit.org/wheel/>.

⁸ È significativo che fra i possibili interventi venga indicato anche un diverso comportamento degli utenti nella gestione dell'edificio (cfr. par. 3.6).

⁹ I *Refurbishment Case Studies* redatti da *Historic Scotland* sono consultabili al sito <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurbcasestudies>. Essi si aggiungono agli interessanti documenti della serie *Technical Papers*, attraverso i quali l'Ente scozzese divulga i risultati di ricerche concernenti molti aspetti dell'efficienza energetica del costruito storico, dalla caratterizzazione termofisica dei materiali alla modellazione degli edifici, dal miglioramento prestazionale degli elementi tecnici agli aspetti economici connessi a tali interventi. Questi documenti sono consultabili al sito <http://www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers>.

Bibliografia

Ambrogio, K., & Zuppiroli, M. (2013). *Energia e restauro: Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali*. Milano: Franco Angeli.

Arenghi, A., & Scaramella, I. (2015). L'efficientamento energetico degli edifici storici: studio di villa Grassani a Flero (BS). *Neo-eubios*, 53, 5-13.

Ascione, F., De Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2011). Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, 43, 1925-1936.

A.T.T.E.S.S. (2010). *La qualità delle prestazioni energetico-ambientali nella manutenzione dell'architettura storica: Linee Guida*. A.T.T.E.S.S. Da http://www.veneto.beniculturali.it/sites/default/files/ATTESS_LINEE_GUIDA.pdf

Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Fortuna, S., Giroto, M., & Volinia, M. (2014). L'LCA a supporto della riqualificazione di un edificio storico. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 517-527). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Boarin, P. (2014). Patrimonio storico – Un approccio prestazionale all'intervento: Riflessioni sulla qualità del processo nella riqualificazione dell'involucro edilizio. *Recupero e Conservazione*, 118, art. 57.

Boarin, P., Dotor, A., & Onecha, B. (2014). Riqualificazione del patrimonio storico con elevati valori testimoniali – Nuove prospettive di sostenibilità: Il caso studio del Padiglione di Sant Manuel dell'Hospital de Sant Pau a Barcellona. *Recupero e Conservazione*, 112, art. 22.

Boriani, M., Giambruno, M., & Garzulino, A. (2011). *Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio*. ENEA. Da http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/rds-64.pdf

Broström, T., Eriksson, P., Liu, L., Rohdin, P., Ståhl, F., & Moshfegh, B. (2014). A Method to Assess the Potential for and Consequences of Energy Retrofits in Swedish Historic Buildings. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 150-166.

Broström, T., & Nilsen, L. (a cura di) (2011). *Postprints from the Conference Energy Efficiency in Historic Buildings. Convegno tenuto a Visby, Svezia, 9-11 febbraio 2011*. Visby: Gotland University Press.

CCEM (Competence Center Energy and Mobility). (2012). *Annual Activity Report 2012*. CCEM. Da http://www.ccem.ch/MediaBoard/CCEM_Annual_Activity_Report_2012.pdf.

Cinieri, V. (2014). Patrimonio edificato diffuso: Un approccio sostenibile alla conservazione e alla gestione (Tesi di Dottorato, XXVII ciclo). Università di Pavia, Pavia, Italia.

Cinieri, V., & Zamperini, E. (2014). Approccio lifecycle alla gestione e conservazione sostenibile del patrimonio costruito. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibi-*

lità per il restauro?" *Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 723-733). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

CISBAT 2015 *Future buildings & districts sustainability from nano to urban scale* (Volumi I e II). *Convegno tenuto a Losanna, Svizzera, 9-11 settembre 2015*. Losanna, Svizzera: EPFL.

Co₂olBricks. (2013). *Improving the Energy Efficiency of Historic Buildings: A handbook of best practice examples, technical solutions and research projects*. Co₂olBricks. Da http://www.co2olbricks.eu/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Publications/Brochure_06_Handbook_best_practice_safe.pdf/.

De Santoli, L. (a cura di). (2014). *Efficienza energetica negli edifici storici*. Milano: Editoriale Delfino.

De Vita, M. (a cura di). (2009). *Città storica e sostenibilità - Historic cities and sustainability. Atti del convegno. Firenze, 17 marzo 2009*. Edizioni Regione Toscana.

English Heritage (2012). *Energy Efficiency and Historic Buildings: Application of Part L of the Building Regulations to historic and traditionally constructed buildings* (Revision note June 2012). English Heritage. Da <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/energy-efficiency-historic-buildings-ptl/eehb-partl.pdf/>.

Eriksson, P., Hermann, C., Hrabovszky-Horváth, S., & Rodwell, D. (2014). EFFESUS Methodology for Assessing the Impacts of Energy-Related Retrofit Measures on Heritage Significance. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 132-149.

Exner, D., & Lucchi, E. (2014). Learning from the past: the recovery and the optimization of the original energy behaviour of "Portici" Houses in Bolzano - Imparando dal passato: il recupero e l'ottimizzazione del comportamento energetico originario delle abitazioni dei "Portici" a Bolzano. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

Fouseki, K., & Cassar, M. (2014). Editorial: Energy Efficiency in Heritage Buildings - Future Challenges and Research Needs. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 95-100.

GBC (Green Building Council) Italia. (2015). *GBC Historic Building: Sistema di verifica GBC Historic Building® - Versione breve ad uso pubblico e divulgativo - Per il restauro e la riqualificazione degli edifici storici* (edizione 2015). GBC Italia. Da <http://www.gbcsitalia.org/risorse/169?locale=it>.

Historic Scotland. (2012). *Refurbishment Case Study 1- Five Tenement Flats, Edinburgh: Wall & window upgrades*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurb-case-study-1.pdf>.

Leissner, J., Kaiser, U., & Kilian, R. (2014). *Climate for Culture: Built cultural heritage in times of climate change*. Lipsia, Germania: Fraunhofer MOEZ.

Litti, G., Audenaert, A., & Braet, J. (2013). Energy retrofitting in architectural heritage, possible risks due to the missing of a specific legislative and methodological protocol. In: *The European Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2013: Official Conference Proceedings*. Convegno tenuto a Brighton, Regno Unito, 4-7 luglio 2013.

Litti, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., Braet, J. (2015). Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings. *Energy and Buildings*, 105, 393-411.

López, M., Yáñez, A., Gomes Da Costa, S., & Avellà, L. (a cura di) (2014). *Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Historic Buildings. Convegno tenuto a Madrid, Spagna, 29-30 settembre 2014*. Madrid: Fundación de Casas Históricas y Singulares y Fundación Ars Civilis.

Lucchi, E., & Pracchi, V. (a cura di). (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*. Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.

Makrodimitri, M., Campbell, J.W.P., & Steemers, K. (2011). Sustainability in the Historic Built Environment - Upgrade of Environmental Performance of Listed structures: The Historic Churches in the UK. In *CISBAT 2011 Cleantech for sustainable buildings: From Nano to Urban Scale* (Volume I). *Convegno tenuto a Losanna, Svizzera, 14-16 settembre 2011* (pp. 529-534). Losanna, Svizzera: EPFL.

Morandotti, M., Besana, D., Pia Riccardi, M., Messiga, B., Cinieri, V., Basso, Malagodi, M., Guidetti, V., Avagliano, R., Grandi, M., Olivero, S., Stirano, F., Donfrancesco, D., & Sabbatelli, R. (2011). *Studio, sviluppo e definizione di linee guida per interventi di miglioramento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto*. ENEA. Da http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-

elettrico/risparmio-energia-settore-civile/rds-63.pdf

Musso, S. F., & Franco, G. (2014). A "comprehensive sustainability". New design paradigms and methods for maintaining, conserving and managing monuments and traditional architecture. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 53-63). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Norrström, H., & Edén, M. (2010). Energy Efficiency and Preservation in Our Cultural Heritage in Halland, Sweden. In *Heritage 2010: Heritage and Sustainable Development, Vol. 1-2. 2nd International Conference on Heritage and Sustainable Development. Convegno tenuto a Evora, Portogallo, 22-26 giugno* (pp. 589-99).

Paleari, M., Lavagna, M., Campioli, A., & De Angelis, E. (2014). Valutazione LCA degli interventi per la conservazione e manutenzione delle superfici di facciata. In: Scalbi, S., & Dominici Loprieno, A. (a cura di). *Atti VIII Convegno della Rete Italiana LCA: I nuovi orizzonti dell'LCA: verso un approccio sistemico e integrato alla progettazione di prodotti, processi e servizi. Firenze, 19-20 giugno 2014* (pp. 101-108). ENEA.

Pianezze, F. (2012). *L'obiettivo del miglioramento dell'efficienza energetica nel processo di conservazione del costruito storico* (Tesi di Dottorato). Politecnico di Milano, Milano, Italia.

Pisello, A. L. (2015). Thermal-energy analysis of roof cool clay tiles for application in historic buildings and cities. *Sustainable Cities and Society, 19*, 271-280.

Pockelé, L., Gandini, A., Bernardi, A., & Rodriguez-Maribona, I. (2014). Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability - Efficienza Energetica per la sostenibilità dei distretti storici europei. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

Rugginenti, S., & Franchini, C. (2010). LEED: un approccio olistico alla certificazione energetica. Metodologia di un rating system per gli edifici storici. *Il Progetto Sostenibile, 27*, 42-47.

Scaramella, I., Fracassi, A., Massetti, A., & Bianchini, D. (2014). L'efficientamento degli edifici storici vincolati: il caso studio del castello estense di Ferrara. *Neo-eubios, 49*, 15-21.

Smith, O. (2014). Balancing Heritage and Environmental Policies for Sustainable Refurbishment of Historic Buildings: The Case of New Court, Trinity College, Cambridge. *The Historic Environment: Policy & Practice, 5* (2), 116-131.

Stephan, E., & Caucheteux, A. (2014). *Réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau. Loire Anjou Touraine*. DREAL Pays de la Loire.

Troi, A., & Bastian, Z. (a cura di). (2014). *Energy efficiency solutions for historic buildings: A Handbook*. Basilea: Birkhäuser. Da <http://www.3encult.eu/en/newsevents/all/NewsDetails.html?entryid=110916>.

Troi, A., & Lucchi, E. (a cura di). (2013). *Cultural Heritage Preservation EWCHP 2013: Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, 16-18 Settembre 2013*. Milano: Felix Verlag editrice.

Widström, T. (2012). Enhanced energy efficiency and preservation of historic buildings - methods and tools for modeling (Tesi di dottorato). KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma, Svezia.

CAPITOLO 3

La qualità energetica e ambientale dell'architettura storica: caratteristiche, esigenze, prestazioni

Energy and environmental quality for the historic architecture: characteristics, requirements, performances

ABSTRACT - *The restoration of a historic building has to be founded on a wide knowledge of its material and construction features, in order to be compatible to the purpose of conservation. This chapter examines the main parameters useful to describe the thermal and hygrometric performance of the historic building and the material and morphological aspects influencing this behaviour. The analysis deals also with the surveys necessary to characterise these performances and with regulation requirements. The aim of this excursus is to highlight the main aspects to be focused in the study of Palermo's historic architecture and its energy improvement. For this purpose, the availability of data and comparisons with other contexts are discussed.*

The hygrometric behaviour of historic constructions, usually named breathability, distinguishes them from modern and new buildings. It affects significantly the possibilities for energy and indoor comfort improvement, since related to risks of mould growth. Specific attention has to be paid notably to component connections, weak points where thermal losses and air leakage are concentrated but transpiration is essential.

Besides material and construction characters, the ratio between openings and opaque envelope, the distribution of inner spaces, the building shape and its integration in the urban texture affect the energy and environmental quality of historic constructions. Notably, they influence the possibilities for natural ventilation, which is a consistent, passive tool for the reduction of overheating. For these characters, recurring elements in the historic tradition of Palermo can be a key factor in assessing impact and effectiveness of energy improvement.

Molti studi mostrano, per diversi contesti geografici, che le soluzioni architettoniche del costruito storico, oltre che seguire evidenti ragioni strutturali, funzionali ed estetiche, miravano anche a garantire un livello accettabile di benessere negli ambienti interni, obiettivo che, in assenza delle tecnologie impiantistiche moderne, poteva essere raggiunto solo adattando l'edificio alle condizioni climatiche locali. Questa sensibilità, sedimentata nelle pratiche costruttive tradizionali e fonte d'ispirazione per i sistemi "passivi" dell'architettura contemporanea, appare accrescersi e razionalizzarsi nel corso del XIX secolo, quando si studiano le caratteristiche fisiche e termiche dei materiali da costruzione, s'indaga la loro influenza sull'igiene dell'edificio, si propongono sistemi per favorire la ventilazione e l'illuminazione naturale degli ambienti interni¹.

Proprio gli studi e le innovazioni ottocenteschi, tuttavia, mettono in luce come la maggior parte degli edifici esistenti fosse lontana dal garantire un livello accettabile di benessere termico, igrometrico e visivo. Basti pensare, per un contesto urbano come quello palermitano, alla scarsa illuminazione delle unità edilizie ai piani bassi. A ciò si aggiungono le conseguenze negative di molti interventi di trasformazione, anche recenti, quali la sigillatura dei lucernari dei vani scala, la chiusura delle chiostrine per il collocamento degli ascensori, lo sfruttamento degli spazi sotto tetto per ricavarne nuove unità immobiliari. In genere, anche per questo insieme di ragioni, gli edifici storici non riescono a soddisfare le esigenze attuali degli utenti, né soprattutto quelle connesse ad alcune destinazioni d'uso, come ad esempio quella museale, che richiedono il rispetto di requisiti particolarmente stringenti (Lucchi, 2009).

La qualità ambientale interna, che include la qualità dell'aria e il benessere termico, acustico e visivo, determina il fabbisogno energetico del fabbricato e costituisce oggi un punto centrale nella progettazione del sistema edificio-impianto. Come per le costruzioni contemporanee, anche per quelle storiche essa è influenzata da ulteriori, molteplici fattori, che spaziano dall'umidità delle murature alle emissioni di radon o di composti organici volatili (GBC 2015). Tuttavia per gli edifici storici, soprattutto di pregio, la qualità ambientale non mira solo al benessere degli utilizzatori ma anche alla conservazione del manufatto. Non a caso nel protocollo GBC *Historic Building*, nell'area tematica "Qualità ambientale interna", si propongono due percorsi, dei quali l'uno persegue principalmente la conservazione dell'edificio, l'altro il massimo livello di benessere e produttività degli occupanti.

Le grandezze attraverso le quali indagare gli aspetti termofisici di una costruzione e la sua richiesta di energia sono numerosi (De Santoli, 2014). Per calcolare il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento, oltre ai dati climatici e alle modalità di occupazione e utilizzo la normativa tecnica (UNI/TS 11300-1:2014) richiede anche la conoscenza delle caratteristiche geometriche, termiche e costruttive dell'edificio. I materiali adoperati, i loro spessori e l'ordine di disposizione influiscono sulla trasmissione del calore e sul trasporto di umidità attraverso i componenti tecnici dell'involucro, mentre le connessioni fra questi possono costituire punti di debolezza nei quali si concentrano perdite, infiltrazioni e manifestazioni di degrado.

Il carattere massiccio dell'involucro, e dunque la sua inerzia termica, consentono di controllare in una certa misura la temperatura interna e di limitarne il condizionamento da parte dell'ambiente esterno. Al contempo l'igroscopicità di molti materiali costruttivi tradizionali contribuisce alla qualità ambientale interna regolando il contenuto di umidità, ma proprio il particolare comportamento igrometrico dei componenti edilizi storici rende inapplicabili molte delle tecniche più diffuse ed efficaci nel miglioramento energetico degli edifici.

Anche la morfologia delle costruzioni e il contesto che le circonda determinano la proporzione fra il volume climatizzato e la superficie disperdente, dunque incidono sugli scambi per trasmissione e ventilazione con l'ambiente esterno. La stessa distribuzione degli spazi interni influenza le possibilità e l'efficacia della ventilazione naturale, il cui ruolo è essenziale nel controllo climatico degli ambienti interni, soprattutto nelle aree a clima temperato (Mammi, 2007 e Grosso, 2011).

La conoscenza del comportamento termofisico dell'edificio storico, o meglio del sistema che esso forma con gli impianti, è fondamentale per individuare le criticità della costruzione e le modalità d'intervento più opportune; soprattutto, è necessaria affinché il miglioramento energetico e ambientale segua i criteri del recupero conservativo, cioè si adatti alle peculiarità della singola architettura. Alcune importanti informazioni, quali la composizione e la stratigrafia dei componenti d'involucro, la presenza di discontinuità e ponti termici, possono essere ricavate da indagini già ampiamente diffuse nel restauro, quali l'endoscopia, la termografia, indagini soniche e radar. Altre informazioni richiedono invece procedure e sistemi di misura ancora poco impiegati, anche in ragione delle difficoltà d'esecuzione: è il caso delle misure in opera di tenuta all'aria e di quelle di conduttanza e trasmittanza termica. Inoltre, in linea con una maggior diffusione della manutenzione in luogo del recupero, soprattutto nelle costruzioni di maggior pregio sarebbe opportuno accostare alla diagnosi preliminare all'intervento un monitoraggio successivo, che metta in luce le prestazioni conseguite e consenta soprattutto di analizzare ed eventualmente modificare le condizioni interne per garantire il benessere dei fruitori e la conservazione dell'edificio.

Di seguito si esaminano, alla luce delle finalità del presente studio, le principali grandezze attraverso le quali si esprimono le prestazioni termiche e igrometriche dell'involucro edilizio e degli elementi tecnici che lo costituiscono. Per mezzo di queste, alla luce della letteratura scientifica sul tema, della normativa tecnica e dei requisiti che la legislazione sull'efficienza energetica fissa per la zona climatica in cui Palermo ricade, si analizzano i dati disponibili per l'architettura storica e in particolare per quella oggetto di studio.

3.1 Cenni termofisici sui materiali della costruzione storica

Le schede di prodotto dei materiali da costruzione, accanto alle caratteristiche di massa volumica, resistenza meccanica e reazione al fuoco, per descriverne il comportamento termico e igrometrico riportano la conducibilità termica, il calore specifico, la resistenza al passaggio del vapore, l'assorbimento d'acqua.

La conducibilità termica², λ , esprime l'attitudine di un materiale al trasferimento di calore ed è fondamentale per determinare la resistenza termica di un mezzo omogeneo di spessore d , $R=d\cdot\lambda^{-1}$; di conseguenza, essa è alla base del calcolo della trasmittanza di un componente edilizio, che si ottiene dalle resistenze termiche dei singoli strati omogenei in cui questo è divisibile. Il calore specifico, C , consente invece di determinare, per un mezzo omogeneo e opaco, caratteristiche pertinenti al regime non stazionario (cfr. par. 3.2.3); infatti, oltre alla capacità termica, utile per valutare l'inerzia di un componente, dal calore specifico possono ricavarsi, noti la massa volumica e lo spessore, anche la diffusività³ e l'effusività termica⁴, che descrivono il legame fra la temperatura interna, quella superficiale e il flusso termico di superficie.

La conducibilità può determinarsi in laboratorio attraverso il "metodo della piastra calda con anello di guardia" o con il metodo del termoflussimetro, la cui applicazione al settore edile è descritta da norme che ne specificano l'impiego per differenti materiali (UNI EN 12664, UNI EN 12667, UNI EN 12939).

Nell'analisi delle costruzioni esistenti, tuttavia, queste grandezze sono desunte essenzialmente dalle raccolte normative esistenti, che le riportano per i principali materiali edili e tra questi anche per quelli di uso tradizionale. La norma tecnica di riferimento a livello internazionale è la UNI EN ISO 10456:2008, i cui dati sono approfonditi per le opere murarie nella UNI EN 1745:2012. A livello nazionale, invece, le proprietà termiche e igrometriche dei materiali da costruzione sono trattate dalla UNI 10351:2015, recentemente aggiornata anche per estenderla a vari materiali, specialmente quelli isolanti, già trattati nella UNI EN ISO 10456. Come alcuni autori rilevano (Lucchi e Pracchi, 2013), fra le due norme sussistono per la conducibilità termica differenze che, relative per lo più ai materiali da muratura, influenzano in misura anche consistente il calcolo della trasmittanza termica degli elementi tecnici, soprattutto quando di notevole spessore (cfr. cap. 4).

La conducibilità termica di un mezzo aumenta al crescere del contenuto d'acqua, che ne occlude la porosità aperta. Un contenuto eccessivo può innescare la formazione di muffa, provocare danni meccanici per via della diversa stabilità dimensionale, quindi anche determinare l'incompatibilità con alcuni interventi d'incremento delle prestazioni energetiche. Dal punto di vista igrometrico, le norme UNI EN ISO 10456 e UNI EN 1745 riportano per ogni materiale il coefficiente di resistenza al passaggio del vapore o coefficiente di diffusione del vapore acqueo⁵, μ , espresso attraverso singoli valori o per intervalli e in genere distinto per condizioni asciutte e bagnate (vedi tab. 3.1). Il coefficiente rende conto del trasporto di vapore acqueo per permeabilità e , moltiplicato per lo spessore del mezzo omogeneo, ne fornisce la resistenza al vapore, S_{a_i} . Per i materiali edili, il coefficiente di diffusione del vapore acqueo è misurato secondo la norma UNI EN ISO 12572:2006.

		Massa volumica ρ		Coeff. di diffusione del vapore acqueo μ		
		[kg·m ⁻³]		[-]		
		UNI EN ISO 10456:2008	UNI EN 1745:2012	Asciutto	Bagnato	
Malte e intonaci	Gesso	600 ÷ 1.500		10	4	
	Malta a base di gesso	1.600		10	6	
	Malta a base di calce	1.600		10	6	
	Malta (per muratura e per intonaci)		200 ÷ 1.400 1.600 ÷ 2.000	5/20 15/35		
Materiali lapidei naturali	Roccia naturale sedimentaria	2.600		250	200	
	Roccia naturale sedimentaria leggera	1.500		30	20	
	Calcare	molto morbido	1.600	≤ 1.590	30	20
		morbido	1.800	1.600 ÷ 1.790	40	25
		semiduro	2.000	1.800 ÷ 1.990	50	40
		duro	2.200	2.000 ÷ 2.190	200	150
molto duro	2.600	2.200 ÷ 2.590	250	200		
Marmo	2.800		2.600 ÷ 2.800	10.000	10.000	
Legno	Legno	450 ÷ 500		50	20	
		700		200	50	
Laterizi	Elementi di argilla (argilla cotta)	1.000 ÷ 1.700		5/10		
		1.800 ÷ 2.400		5/10 50/100 se in facciata		

Tabella 3.1. Valori del coefficiente di diffusione del vapore acqueo desunti dalle raccolte normative esistenti.

La norma UNI 10351:2015 riporta la permeabilità al vapore dei materiali, dalla quale può ricavarsi il coefficiente μ , essendo questo il rapporto fra la permeabilità dell'aria, che è unitaria, e quella del materiale esaminato. La norma distingue la permeabilità in campo asciutto, δ_a , e in campo umido, δ_u , la prima riferita all'intervallo di umidità relativa 0 ÷ 50%, la seconda all'intervallo 50 ÷ 95%. Per i casi in cui riporta degli intervalli di permeabilità anziché dei valori singoli, la norma suggerisce di scegliere il valore minore per i materiali disposti verso il lato interno della parete, il maggiore per quelli posti verso il lato esterno (vedi tab. 3.2).

		Massa volumica ρ	δ_a	δ_u
		[kg·m ⁻³]	[kg·ms ⁻¹ ·Pa ⁻¹]	[kg·ms ⁻¹ ·Pa ⁻¹]
Malte e intonaci	Intonaco di gesso puro	1.200	≈ 18	
	Intonaco di calce e gesso	1.400	≈ 18	
	Malta di calce o di calce e cemento	1.800	5 a 12	
Laterizi	Mattoni pieni, forati, leggeri	600 ÷ 2.000	18 a 36	18 a 36
Legnami	Abete (flusso perpendicolare alle fibre)	450	≈ 0,3	≈ 0,9
	Abete (flusso parallelo alle fibre)	450	≈ 4,5	≈ 6
	Pino, acero, quercia (flusso perpendicolare alle fibre)	550, 710, 850 (rispettivamente)	≈ 4,5	≈ 4,5

Tabella 3.2. Valori di permeabilità al vapore desunti dalla norma UNI 10351:2015, che tuttavia non riporta alcuna indicazione in merito ai materiali lapidei naturali.

Il coefficiente di diffusione del vapore acqueo, nota la temperatura di rugiada, consente di analizzare la condensazione per trasporto di vapore che avviene all'interno dei componenti edilizi secondo il metodo di Glaser (UNI EN ISO 13788). Questa, però, è solo una delle possibili fonti di umidità, cui si aggiungono l'acqua di risalita, quella pluviale o dispersa, per gli edifici nuovi anche quella dovuta alle fasi di costruzione. Infatti gli scambi di acqua e vapore che si verificano attraverso i componenti d'involucro sono regolati, oltre che dalla diffusione del vapore per permeabilità, anche dal suo scambio per igroscopicità e dal trasporto di acqua per capillarità, anch'essi legati alla porosità aperta del materiale e alle dimensioni dei pori. Per descrivere questi meccanismi, necessari per impiegare il metodo di analisi igrometrica dinamica della norma UNI EN 15026, bisogna tener conto per i materiali da costruzione anche di altri parametri.

Per la capillarità si considera dunque un coefficiente di assorbimento d'acqua, determinato secondo la norma UNI EN ISO 15148:2003 (cfr. par. 4.3.3), ma anche alle velocità di assorbimento e asciugatura dei materiali, determinate secondo procedure per immersione o per diffusione, quali quelle descritte dalle UNI EN 12087 e 12088 per i materiali isolanti.

Infine per la capacità igroscopica di un materiale, che ne determina l'attitudine a regolare le condizioni di umidità interna, bisogna far riferimento al suo contenuto di umidità di equilibrio, cioè all'umidità che esso contiene in determinate condizioni di temperatura e umidità ambientale. Tutti i materiali che cedono o assorbono vapore acqueo per mantenere il proprio equilibrio igrometrico sono a rigore igroscopici. In edilizia, però, si considerano tali quelli in cui gli scambi igrometrici sono al di sopra di una certa soglia. Ciò è influenzato anche dalla massa del materiale, dalla velocità con cui scambia vapore con l'ambiente, dallo spessore che partecipa attivamente a tale attività di scambio.

Sulle prestazioni degli elementi d'involucro influiscono anche le caratteristiche superficiali, legate alla rugosità e al colore dei materiali ed espresse attraverso l'emissività termica⁶, ϵ , e la riflettanza solare⁷, α . La prima esprime la capacità del materiale di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso e indica la frazione del calore assorbito che è rie-

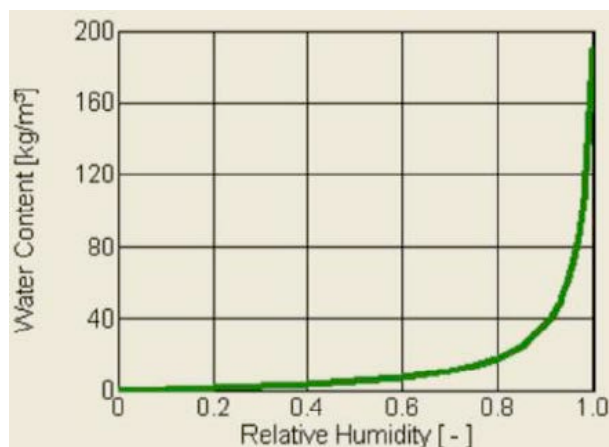


Figura 3.1. Isoterma di igroscopicità per mattoni pieni da muratura. Da Browne (2012).

messa verso l'esterno. Attraverso l'emissività si definiscono il comportamento bassoemissivo (invernale) o riflettente (estivo) dei materiali edili, in particolare degli isolanti e dei vetri. Ampie raccolte di valori sono disponibili in ambito termografico, in quanto tale grandezza è essenziale nel definire la temperatura superficiale di un componente edilizio secondo l'equazione di Stefan-Boltzmann. La UNI/TS 11300-1:2014, invece, considera come valori tipici di emissività termica per la superficie esterna degli elementi tecnici 0,90, per i vetri senza deposito superficiale 0,837.

Indipendente dall'emissività è la riflettanza solare, che caratterizza una superficie per l'intero spettro solare. Essa è generalmente espressa in termini di riflettanza solare totale (*Total Solar Reflectance*, TSR), per tener conto della riflessione della radiazione ultravioletta, di quella visibile e di quella infrarossa. La riflessione solare di una superficie è strettamente legata alla sua rugosità e al colore; com'è noto, è maggiore per le superfici chiare. La conoscenza empirica di questi fenomeni radiativi in epoca storica è dimostrata dalla diffusione di colori chiari e delle superfici riflettenti (spesso costituite da mattoni maiolicati) per il rivestimento delle superfici esposte a un eccessivo irraggiamento, ma anche per favorire l'illuminazione di spazi interni o esterni angusti. In quest'ottica sono molto interessanti gli studi che, nel corso del XIX secolo, indagavano l'*albedo* delle superfici per migliorare la qualità luminosa dei densi tessuti storici e limitare i problemi di surriscaldamento interno (Vinci, 2003 e 2013).

L'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) ha combinato la riflettanza solare e l'emissività termica in un indice di riflessione solare, SRI, che i protocolli di certificazione LEED adoperano per fissare requisiti volti a limitare il fenomeno dell'isola di calore. L'elevato assorbimento di energia solare da parte delle superfici costruite, in particolare quelle stradali e di copertura, si traduce in un innalzamento della temperatura urbana, che supera anche di 3°C quella delle zone rurali circostanti; accanto a una scarsa qualità ambientale esterna, ne conseguono anche problemi energetici, in quanto tale surriscaldamento determina un notevole innalzamento del fabbisogno di energia per il raffrescamento. I protocolli LEED, pertanto, richiedono per le coperture a bassa inclinazione un valore di SRI pari almeno a 78, mentre il limite minimo è 29 per le coperture molto pendenti.

Le proprietà superficiali dei componenti sono contemplate anche dalla normativa tecnica (UNI 10375), per calcolare la temperatura interna degli ambienti durante il periodo estivo in assenza d'impianto di climatizzazione. A tal fine è necessario il coefficiente di assorbimento della radiazione solare incidente sulla superficie esterna, per il quale la norma indica il valore da adoperare in funzione del colore (0,3 per superfici chiare, 0,6 per quelle di colore intermedio e 0,9 per le superfici scure). Data l'influenza rilevante che tale parametro ha nella determinazione della temperatura interna estiva, Arengi (in Galbusera et al., 2010) ne ha proposto una correlazione con le scale di colore adoperate in ambito commerciale, in particolare con il sistema *Natural Colour System* (NCS).

3.2 Grandezze termiche per le chiusure opache

3.2.1 La trasmittanza termica per i componenti dell'edificio storico

Per i componenti tecnici d'involucro la legislazione nazionale sull'efficienza energetica (in particolare il D.M. 26 giugno 2015) stabilisce requisiti di trasmittanza termica, massa superficiale e trasmittanza termica periodica. La trasmittanza termica U è la grandezza più adoperata per descrivere e valutare le prestazioni energetiche degli elementi tecnici. Per essa la normativa indica i valori massimi consentiti per gli elementi opachi e trasparenti in funzione della zona climatica⁸. I limiti sono ridotti del 10% e quindi più stringenti per gli edifici pubblici, e ancor di più lo sono quelli che danno accesso agli incentivi fiscali, specialmente per le pubbliche amministrazioni (tab. 3.3).

	U_{limite} D.M. 26.06.2015 [W·m ⁻² K ⁻¹]	U_{limite} Edifici pubblici [W·m ⁻² K ⁻¹]
Strutture opache verticali	0,45	0,405
Coperture	0,38	0,342
Strutture opache orizzontali di pavimento verso locali non riscaldati o verso l'esterno	0,46	0,414
Chiusure trasparenti	3,20	2,88

Tabella 3.3. Requisiti normativi di trasmittanza termica per la zona climatica B.

Mentre per i materiali omogenei si fa riferimento alla conducibilità termica, che consente di determinarne la resistenza una volta noto lo spessore, per i componenti eterogenei, costituiti cioè da più strati o porzioni differenti, ci si riferisce alla conduttanza termica o conducibilità termica equivalente, Λ . Essa esprime l'attitudine di un componente a condurre il calore ed è l'inverso della sua resistenza totale, che è la somma delle resistenze dei singoli strati omogenei. La trasmittanza termica, aggiungendo alla resistenza totale del componente quelle superficiali, tiene conto anche dei contributi convettivi e per questo è preferita alla conduttanza nel descrivere il comportamento termico degli elementi d'involucro. Essa lo caratterizza in modo completo quando le condizioni di temperatura sono stazionarie, quando cioè la temperatura è costante sui due lati del componente; in questo caso la distribuzione della temperatura dipende solo dalla conduttività dei materiali (Salani, 2010). Tuttavia la temperatura varia nel tempo e quindi il suo andamento, come quello del flusso, dipende anche dall'inerzia termica dei materiali, che ha particolare rilievo nel periodo estivo, nel quale le variazioni diurne di temperatura esterna sono maggiori rispetto a quelle invernali (cfr. par. 3.2.3).

La trasmittanza termica di un componente edilizio può essere determinata in laboratorio adoperando il metodo "della camera calda"; per la muratura questo è descritto dalla norma UNI EN 1934:2000, per le finestre dalla UNI EN ISO 12567-1:2010⁹. Questa procedura di misura è poco praticabile negli edifici esistenti, per i quali si può ricorrere invece alla determinazione in opera secondo le indicazioni della norma ISO 9869:1994. Tuttavia, per le difficoltà di esecuzione della prova (cfr. par. 3.2.2), in genere la trasmittanza termi-

ca è solo calcolata, secondo il metodo della UNI EN ISO 6946:2008, o desunta da raccolte e abachi normativi. Questi però prendono solo parzialmente in considerazione i materiali e i componenti propri del costruito storico.

La norma UNI 10355:1994, che impiega i valori di conducibilità termica della UNI 10351:1994, riporta la resistenza termica di varie tipologie di murature e solai. Tuttavia i casi che essa contempla si riferiscono essenzialmente a chiusure in laterizi forati e muratura armata e alla tecnologia del calcestruzzo armato. Sono adattabili al costruito storico solo i valori relativi alle murature di mattoni, per le quali però la norma tratta spessori sino a 425 mm, piuttosto esigui rispetto a quelli comunemente riscontrabili nell'architettura storica.

Valori tabellari possono essere desunti dalla UNI/TR 11552:2014, che di recente ha sostituito e ampliato la raccolta prima in appendice alla UNI/TS 11300-1:2008. Questi valori, che la norma suggerisce per i casi in cui non si abbiano informazioni sulla composizione interna dell'elemento tecnico, riguardano le chiusure verticali, i solai e le coperture e si riferiscono anch'essi per gran parte alle tecnologie costruttive attuali. Mentre per gli orizzontamenti piani si considerano soltanto strutture in calcestruzzo armato, per le coperture inclinate la norma riporta una trasmittanza di $1,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ per i "tetti in legno". Per le murature, invece, sono applicabili al costruito storico i valori indicati per la "muratura di pietrame intonacata" (con spessori da 30 a 60 cm) e per la "muratura di mattoni pieni intonacata sulle due facce" (da 15 a 60 cm). Anche se in modo più forzato, appaiono impiegabili anche i dati relativi alla "muratura di mattoni semipieni o tufo" (anch'essa da 15 a 60 cm).

Spessore [m]	TRASMITTANZA TERMICA									
	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]									
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Muratura di pietrame intonacata	-	-	-	2,99	2,76	2,57	2,40	2,25	2,11	2,00
Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	2,59	2,58	2,01	1,77	1,56	1,39	1,25	1,14	1,07	1,04
Muratura di mattoni semipieni o tufo	2,19	1,96	1,76	1,57	1,41	1,26	1,14	1,04	0,96	0,90

Tabella 3.4. Valori di trasmittanza termica per le chiusure verticali opache riportati dalla norma UNI/TR 11552:2014 per i casi nei quali non si abbiano informazioni sulla stratigrafia del componente.

Se da un lato gli spessori esaminati dalla norma sono solo in parte rappresentativi di quelli diffusi nel costruito storico, dall'altro non si indaga la variabilità delle caratteristiche termiche né per i laterizi né soprattutto per i materiali lapidei naturali, determinando scostamenti significativi rispetto ai valori di trasmittanza ricavati dalle misure in opera (Lucchi e Pracchi, 2013) (cfr. cap. 4).

La UNI/TR 11552:2014, inoltre, ripropone e amplia l'abaco delle chiusure verticali della UNI/TS 11300-1, estendendolo ai solai e alle coperture. Con quest'abaco, la norma mira a dare indicazioni sulle principali tipologie costruttive utilizzate in Italia, riportando per ciascuna la stratigrafia con l'indicazione delle principali caratteristiche dei materiali (spessore, massa volumica, calore specifico, conducibilità termica, resistenza dello strato omogeneo);

combinando variamente gli strati, infine, essa indica la trasmittanza termica delle chiusure e, per quelle verticali, la "capacità termica areica" e la trasmittanza termica periodica.

L'abaco esamina in varie configurazioni quattro ipotesi costruttive per solai in legno a orditura semplice senza (SOL09) o con controsoffitto (SOL10) o con massetto in calcestruzzo alleggerito (SOL11, SOL 12, il primo senza e il secondo con controsoffitto) e per ciascuno riporta i valori di trasmittanza in base alla direzione del flusso termico. Analogamente, per coperture inclinate in legno (CIN05) con assito di tavole ($\lambda=0,150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) e tegole in laterizio l'abaco indica una trasmittanza di $2,50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e analizza anche ipotesi di coibentazione (CIN 01 e CIN 02).

TRASMITTANZA TERMICA DEI SOLAI					
[W·m ⁻² ·K ⁻¹]					
Codice	Strati	Spessore [cm]	per direzione del flusso		
			ascendente	discendente	orizzontale
SOL09	(Pavimentazione, assito, travi)	1,5 - 3	3,16	2,58	2,88
		1,5 - 6	2,07	1,81	1,95
SOL10	(Pavimentazione, assito, travi, controsoffitto)	1,5 - 3 - 10/25 - 1	1,68	1,50	1,60
		1,5 - 6 - 10/25 - 1	1,31	1,20	1,26
SOL11	(Pavimentazione, massetto in calcestruzzo alleggerito, assito, travi)	1,5 - 6 - 3	2,38	2,04	2,22
		1,5 - 6 - 6	1,70	1,52	1,62
SOL12	(Pav., massetto in cls. alleggerito, assito, travi, controsoffitto)	1,5 - 6 - 3 - 10/25 - 1	1,43	1,30	1,37
		1,5 - 6 - 6 - 10/25 - 1	1,15	1,07	1,12

Tabella 3.5. Valori di trasmittanza termica per gli orizzontamenti, desunti dall'abaco dei componenti tecnici contenuto nella norma UNI/TR 11552:2014.

Per le murature, agli strati d'intonaco, sia interni sia esterni, è assegnato sempre¹⁰ uno spessore di 2 cm; a quello interno la norma attribuisce i parametri $\rho=1.400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c=1.000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda =0,700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$; a quello esterno $\rho=1.800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c=1.000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda =0,900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Per gli strati non omogenei, formati dai conci e dalla malta, la massa volumica è riferita allo strato nel suo insieme. La UNI/TR 11552 tratta, fra le altre, murature in laterizio pieno, in pietra e in "materiale composito". Nell'ambito delle prime, per le quali la conducibilità del laterizio è posta pari a $0,720 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, gli spessori indagati sono compresi fra 12 e 64 cm (esclusi i rivestimenti a intonaco).

Fra le pareti in "materiale composito", si riferiscono all'architettura storica le tipologie "in mattoni e sassi" e "a sacco con riempimento debolmente legato"; nel primo caso alla parte strutturale (40÷100 cm) si associa una conducibilità di $0,900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$; nel secondo caso, che però prevede l'impiego sia di mattoni pieni (25 cm) sia di forati (8 cm), al riempimento (5÷20 cm) si associa una conducibilità di $0,700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Fra le pareti in pietra, infine, l'abaco include le murature "in pietra listata con mattoni", "in pietra" e "in blocchi quadrati di tufo". Nelle prime (12÷64 cm escluso l'intonaco) è ipotizzato l'impiego di "mattoni e sassi" con $\lambda =0,900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$; nelle seconde (40÷100 cm sempre per la sola parte strutturale) si adopera $\lambda =2,400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$; nelle terze (30÷70 cm) $\lambda =0,550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

TRASMITTANZA TERMICA DELLE MURATURE [W·m ⁻² ·K ⁻¹]								
Spessore (int./mur./int.) [cm]	MLP01	MPI01	Spessore (int./mur./int.) [cm]	MLP02	Spessore (int./mur./int.) [cm]	MPI02	MPI03	MCO01
2-12-2	2,58	2,82	1,5-12	2,79	2-30-2	-	1,30	-
2-25-2	1,76	2,01	1,5-25	1,86	2-40-2	2,58	1,05	1,50
2-38-2	1,34	1,55	1,5-38	1,39	2-50-2	2,33	0,88	1,29
2-51-2	1,08	1,27	1,5-51	1,11	2-60-2	2,12	0,76	1,18
2-64-2	0,90	1,07	1,5-64	0,93	2-70-2	1,95	0,67	1,00
-	-	-	-	-	2-80-2	1,80	-	0,90
-	-	-	-	-	2-90-2	1,68	-	0,82
-	-	-	-	-	2-100-2	1,57	-	0,75

Tabella 3.6. Valori di trasmittanza termica per le murature desunti dall'abaco della norma UNI/TR 11552:2014. I codici indicano le seguenti tipologie: "muratura in mattoni pieni" (MLP01), "muratura in mattoni pieni-faccia a vista" (MLP02), "muratura in pietra listata con mattoni" (MPI01), "parete in pietra"(MPI02), "muratura in blocchi squadrati di tufo"(MPI03), "muratura mattoni e sassi" (MCO01).

Sebbene sia più dettagliato rispetto a quello prima contenuto nella norma UNI/TS 11300-1, tuttavia quest'abaco si presta poco all'utilizzo sull'architettura storica, in quanto non tiene conto della varietà di materiali da muratura adoperati nelle tradizioni locali, molto diversi per caratteristiche fisiche e quindi anche termiche. Analogamente, i dati di trasmittanza termica riportati nel fascicolo italiano del progetto TABULA per i componenti d'involucro d'uso comune, pur riferiti anche alle costruzioni tradizionali, risultano generici (cfr. tab. 3.7).

ELEMENTO TECNICO	TRASMITTANZA TERMICA (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
Muratura di pietra intonacata	(45 cm) 2,40 (60 cm) 2,00
Muratura di pietra listata con mattoni	(40 cm) 1,61 (60 cm) 1,19
Muratura in mattoni pieni	(25 cm) 2,01 (38 cm) 1,48 (50 cm) 1,14 (62 cm) 1,02
Volta in mattoni laterizi	2,07
	come chiusura inferiore 1,58
Solaio in legno con tavelle di laterizio	2,86
Solaio in legno con tavelle di laterizio e controsoffitto in stuoie di canne	1,96
Solaio con profilati metallici e voltine laterizie	2,60
Copertura a falde lignea con tavolato e tegole in laterizio	1,80

Tabella 3.7. Dati di trasmittanza termica per gli elementi dell'involucro opaco da Corrado et al. (2014).

Più dettagliata è invece una raccolta francese curata dall'Istituto CSTB (Moye, 1980), che riporta valori di trasmittanza termica (*coefficient K*, in $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$) per i materiali edili adoperati in Francia sino al 1948. Accanto a valori per costruzioni in calcestruzzo, sono numerosi quelli applicabili all'architettura storica ed estendibili, almeno in parte, al contesto italiano. Ad esempio, sono forniti valori di trasmittanza relativi a pareti realizzate in legno, in pisé (40÷80 cm), in mattoni pieni (9÷70 cm); si considerano inoltre murature in pietra da taglio e pietrame informi (20÷80 cm) realizzate, anche con struttura a sacco (50÷80 cm), adoperando vari materiali lapidei (*granites, gneiss, porphyres, pierres calcaires, grès, meulières, schistes, pierres volcaniques*) (cfr. par. 4.2).

Il metodo di calcolo della trasmittanza termica, descritto dalla UNI EN 6946:2008, si basa sulla resistenza termica totale del componente e sulle resistenze delle superfici interna ed esterna che lo delimitano, secondo la relazione $U = R_T^{-1} = (R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se})^{-1}$.

Le resistenze superficiali possono essere desunte dalla norma stessa, che le fornisce per diverse direzioni di flusso termico¹¹. Il calcolo della resistenza totale, invece, richiede una conoscenza accurata della stratigrafia del componente e della resistenza termica dei singoli strati. Per le costruzioni recenti, la produzione seriale degli elementi che formano i componenti tecnici rende piuttosto semplice l'individuazione degli spessori e affidabili i valori di conducibilità riportati dalle norme. Per gli edifici storici, invece, il reperimento di informazioni sulla composizione degli elementi tecnici può essere supportato dagli studi sulle tecniche costruttive locali (ad esempio i Manuali del recupero) e dalle ricerche d'archivio, ma in molti casi necessiterebbe comunque di prove distruttive o parzialmente tali, spesso inapplicabili soprattutto per edifici di pregio o in buono stato di conservazione. La questione appare particolarmente complessa nel caso delle murature, in quanto molti degli aspetti che ne influenzano il comportamento termico, quali l'eterogeneità dei materiali impiegati, l'apparecchio murario, il contenuto di malta, la presenza di discontinuità (canalizzazioni, fodere, eccetera), difficilmente possono essere individuati visivamente e spesso, anzi, sono celati dietro rivestimenti a intonaco.

In particolare per i materiali lapidei, le discrepanze fra i valori di conducibilità indicati dalle collezioni normative si riverberano sul calcolo della trasmittanza termica; per molti materiali, inoltre, la scelta della conducibilità dipende dalla conoscenza della massa volumica, non sempre determinabile con esattezza senza ricorrere a prove distruttive. Al contempo le procedure e i programmi di calcolo, che consentono di modellare facilmente le murature in conci squadrate con giunti regolari (una metodologia di calcolo agli elementi finiti è descritta nella norma UNI EN 1745:2012), mal si adattano alla simulazione delle murature a sacco, per le quali è difficile anche individuare parametri termofisici affidabili per il riempimento interno. Rendono il quadro ancora più incerto la presenza di vuoti e i degradi non visibili, che il metodo di calcolo della UNI EN ISO 6946 non tiene in conto ma che, come il contenuto di umidità, influenzano sensibilmente la prestazione effettiva della parete.

Specialmente per le murature, dunque, il calcolo della trasmittanza termica appare poco affidabile e, secondo quanto evidenziato dalla letteratura scientifica, tende a sovra-

stimarne il valore (cfr. par. 4.1). Pertanto molte ricerche concordemente ritengono opportuno analizzare la trasmittanza termica dei componenti d'involucro degli edifici storici mediante il ricorso a misure in opera.

3.2.2 La misura in opera della trasmittanza termica

La norma ISO 9869:1994 descrive una procedura di misura in opera della trasmittanza e della conduttanza termica da applicare a componenti edilizi opachi, di superficie piana, ortogonali al flusso di calore e privi di flussi laterali significativi. Per altri componenti la norma suggerisce di determinare la trasmittanza mediando i risultati di numerose misure oppure ricorrendo, in laboratorio, al metodo con calorimetro; così può procedersi ad esempio per le chiusure orizzontali (solai con controsoffitto, solette contro terra), ma secondo varie fonti anche per i vetri (Baker, 2010; Lucchi, 2012).

Il metodo descritto dalla norma si basa sulla misura diretta di un flusso di calore e di due temperature. Il flusso è quello che attraversa il componente indagato per effetto della differenza di temperatura che sussiste fra i due ambienti che esso separa; le temperature sono quelle ambientali, rilevate in prossimità delle superfici dell'elemento tecnico. Se le temperature misurate sono quelle delle superfici, dai dati rilevati non si ricava la trasmittanza termica ma la conduttanza, dalla quale la prima può calcolarsi impiegando le resistenze superficiali riportate nella UNI EN ISO 6946:2008.

Dal flusso e dalle temperature misurati, la conduttanza e la trasmittanza si ottengono seguendo due metodi alternativi, quello delle medie progressive e quello definito *black box*. Il primo è ritenuto preferibile perché si basa sulle equazioni che descrivono fisicamente il flusso di calore, mentre l'applicazione del secondo metodo, puramente numerico, è consigliata per la verifica dei risultati ottenuti (Lucchi, 2012).

Il flusso termico è misurato mediante una piastra, comunemente detta termoflussimetro (in inglese *heat flowmeter*, HFM), cioè un trasduttore attraversato da un flusso di calore di cui il segnale elettrico che emette è funzione diretta. La piastra è costituita da sensori di temperatura, posti in un supporto rigido o flessibile, di resistenza termica bassa e nota, ad esempio teflon (Adhikari, Lucchi e Pracchi, 2012), silicone (Lucchi, 2012) o resina epossidica. Il sensore è posto in genere sulla superficie interna dell'elemento indagato.

Le sonde di temperatura superficiale sono delle termocoppie; in alcuni casi sono incorporate nel termoflussimetro, sulla faccia a contatto con la superficie del componente oggetto di misura. Per la temperatura ambientale, invece, i sensori cambiano a seconda che si misuri quella dell'aria, quella cosiddetta *sol-air* o quella di benessere termico (ISO 9869:1994), ma in ogni caso devono essere ventilati e schermati dalla radiazione solare e termica. Queste difficoltà e le connesse incertezze inducono in genere a prediligere le più agevoli misure di conduttanza, per le quali comunque alcuni autori suggeriscono anche l'impiego di un sensore di temperatura ambientale interna, volto a verificarne la stabilità e a ridurre gli errori di misura dovuti a sue eventuali variazioni improvvise (Lucchi, 2012).

I dati rilevati dai sensori sono raccolti in un *data-logger*, al quale pervengono mediante

un collegamento con fili o in modalità *wireless*. Gli strumenti del primo tipo limitano le indagini non soltanto per la lunghezza dei fili, ma anche perché la presenza di questi rende talvolta impossibile il collegamento al *data-logger*, ad esempio nel caso di pareti cieche. Invece le sonde senza fili rendono possibile anche la rilevazione contemporanea di punti dislocati nell'intero edificio, ma possono essere soggette alla perdita del segnale.

Con il metodo delle medie progressive la norma richiede che i valori, media di più determinazioni, siano registrati con intervalli di campionamento compresi fra trenta e sessanta minuti, ma in letteratura per gli edifici storici questi non superano in genere i dieci minuti. Un tempo breve di rilevazione, infatti, è utile per contenere l'influenza sul risultato finale delle perdite temporanee di segnale o di anomalie dovute, ad esempio, al passaggio di persone (Bellotti e Sangalli, 2014).

I sensori possono essere collegati al componente indagato con una pasta di conducibilità termica nota (si può adoperare anche resina epossidica, nel caso in cui il sensore debba essere impiegato *una tantum* e sia possibile danneggiare la superficie), con connessioni meccaniche (ad esempio con viti) oppure con nastro adesivo, verificando che l'adesione al supporto non determini la formazione di un'intercapedine d'aria (vedi fig. 3.2). Un degra-



Figura 3.2 (a sinistra). Connessione meccanica di un sensore di temperatura superficiale al paramento esterno di una struttura muraria (Baker, 2011).

Figura 3.3 (a destra). Sensori di flusso termico e temperatura superficiale, connessi alle superfici decorate della sala del trono del castello di Neuschwanstein (Germania) attraverso un sistema che garantisce la conservazione del supporto (Raffler et al., 2014). Nel caso mostrato, i sensori non sono stati adoperati per misure di conduttanza.

do avanzato della superficie del componente da indagare, tuttavia, può inibire l'esecuzione della prova, soprattutto nel caso degli edifici storici, dove il collegamento deve evitare tale danneggiamento. A tal fine si suggerisce spesso l'impiego di nastro adesivo di carta, avendo cura che la sua colorazione sia simile a quella della superficie esterna dell'elemento da indagare, soprattutto quando esposta alla luce solare. Recentemente sono stati proposti anche sistemi di fissaggio completamente reversibili per applicazioni su superfici di particolare pregio (Raffler, Bichlmair e Kilian, 2014).

La norma ISO 9869 suggerisce di prediligere per le indagini le superfici esposte a nord, in modo da rendere minima l'incidenza della radiazione solare diretta, e in generale quelle ombreggiate e protette dalle intemperie, ad esempio per la presenza di oggetti o grazie all'apposizione di schermi durante lo svolgimento della prova. Il punto di misura dev'essere caratterizzato da un flusso di calore ortogonale alla parete; dunque è necessario scegliere punti sufficientemente regolari, in posizione preferibilmente intermedia fra pavimento e soffitto, fra spigoli murari e vani di apertura. Soprattutto, è necessaria una certa omogeneità nella composizione della parete, cui frequentemente si contrappongono, nelle pareti storiche, vani tamponati, canalizzazioni, cambi di materiali o apparecchio murario, in molti casi non visibili perché celati da rivestimenti a intonaco. La norma, quindi, prescrive che la scelta del punto sia fatta in base a una preliminare indagine termografica.

Essendo la piastra di flusso termico molto sensibile agli scambi di calore per convezione e irraggiamento, che altererebbero i risultati, è opportuno scegliere punti di misura non eccessivamente ventilati, lontani da terminali di climatizzazione e non esposti a illuminazione diretta. A tal proposito, nell'impiego dei sensori di flusso termico, alcune fonti consigliano, anche per prove diverse da quelle di trasmittanza in opera, il ricorso a uno schermo di protezione, ad esempio in cartone rivestito dal lato interno con una pellicola in materiale bassoemissivo (ANIT, 2013c); questo accorgimento, non segnalato nella norma ISO 9869, non si riscontra nella letteratura consultata sulla misura della trasmittanza o conduttanza termica delle pareti.

Un'altra condizione rilevante per l'attendibilità delle misure è che fra le due superfici dell'elemento tecnico indagato vi sia una differenza consistente di temperatura; molte fonti consigliano che questa sia almeno pari a 10 °C. La letteratura scientifica sul tema, che riguarda essenzialmente campagne di misura condotte in climi freddi, suggerisce di svolgere le misure durante il periodo invernale; talvolta si sconsigliano espressamente le misure estive per la maggiore variabilità della temperatura fra giorno e notte. Relativamente al caso di studio (cfr. cap. 4), nelle condizioni climatiche di Palermo raramente si registra d'inverno una differenza di temperatura stabilmente prossima a 10 °C; in estate invece la differenza fra uno spazio climatizzato e l'esterno più facilmente rispetta questo requisito nelle ore diurne, ma effettivamente a prezzo di una sensibile oscillazione giornaliera.

La necessità di una consistente differenza di temperatura fra interno ed esterno richiede, nel caso l'indagine riguardi ambienti o edifici non climatizzati, un riscaldamento dell'aria in prossimità della zona di misura, soluzione difficilmente praticabile quando le misure sono

eseguite mantenendo l'edificio in uso. Per ovviare a tali problemi alcuni strumenti¹², che richiedono però il fissaggio meccanico, applicano al componente una sensibile differenza di temperatura in modo da ridurre sensibilmente la durata della prova e consentire il suo svolgimento anche in assenza di flussi naturali di calore.

Infatti, affinché la resistenza termica desunta dalle misure non si scosti di più del 5% dal valore ottenuto nelle ventiquattro ore precedenti, la norma ISO 9869 prescrive che per elementi pesanti¹³ la durata minima della prova sia di settantadue ore nel caso in cui la temperatura sia stabile in prossimità del termoflussimetro. Tuttavia questa condizione è pressoché impossibile in opera e la misura deve essere condotta per un tempo maggiore, soprattutto se le condizioni climatiche esterne non sono stabili e la struttura ha notevole inerzia termica, come avviene frequentemente nel caso delle murature storiche. Per quest'ultima alcuni studi riportano tempi di misura di 180÷220 ore (per murature spesse sino a 110 cm; Adhikari et al., 2012, Bellotti e Sangalli, 2014), altri superiori a due settimane (sino anche a quattro; Baker, 2011), mentre nelle esperienze condotte a Palermo (cfr. cap. 4), è risultata sufficiente, per murature spesse circa 60 cm, una durata di quattordici giorni. Riducendosi la differenza di temperatura, e quindi il flusso termico, è necessario prolungare la durata della prova.

Dunque lievi differenze di contatto fra sensori e superficie, fluttuazioni di temperatura e flusso di calore nel corso della prova, l'esposizione alla ventilazione, a sorgenti di calore e alla radiazione solare, influenzano la misura in opera della conduttanza o della trasmittanza termica e la rendono meno accurata. La norma, infatti, stima che dai risultati possa attendersi un'incertezza elevata, compresa fra il 14% e il 28%. Questa, insieme alle disomogeneità che connotano gli elementi d'involucro di un edificio storico, rende necessaria la ripetizione della prova per ottenere valori attendibili, ma ciò è ostacolato dalla sua lunga durata.

3.2.3 Parametri termici dinamici

La normativa nazionale sull'efficienza energetica prescrive, per garantire condizioni estive di benessere, un'adeguata inerzia termica¹⁴; per le pareti verticali non esposte nel quadrante NO/N/NE richiede una massa superficiale superiore a $230 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ o una trasmittanza termica periodica di modulo inferiore a $0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Per le chiusure orizzontali e inclinate, invece, la normativa non fissa un limite di massa superficiale, che molte strutture leggere come quelle lignee non potrebbero rispettare; richiede piuttosto che il modulo della trasmittanza termica periodica non superi $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

I principali parametri adoperati per esprimere il comportamento termico dinamico dei componenti d'involucro sono, com'è noto, la trasmittanza termica periodica, il fattore di attenuazione e lo sfasamento¹⁵. Queste grandezze, che rendono conto dell'inerzia termica dei componenti, sono fondamentali per calcolare la temperatura di un ambiente interno e quindi per valutare le condizioni di benessere (Scaramella, Arengi e Turla, 2009). La norma UNI 10375, a tal proposito, associa a ogni componente d'involucro un flusso

termico orario dipendente, fra l'altro, dalla sua trasmittanza in regime stazionario, dallo sfasamento dell'onda termica e dal fattore di attenuazione. Attraverso questi due parametri la trasmittanza termica periodica è legata a quella in condizioni stazionarie; infatti il rapporto fra i due coefficienti di trasmissione è un numero complesso, del quale il fattore di attenuazione è il modulo, lo sfasamento la fase. Il comportamento invernale ed estivo di un elemento tecnico d'involucro è quindi noto se si conoscono la trasmittanza in regime stazionario e quella dinamica.

I parametri termici dinamici sono legati alle caratteristiche fisiche del componente e al periodo dell'onda termica, che può essere orario, giornaliero, annuale. Per determinare il benessere termico e i consumi energetici è di maggior interesse quello giornaliero, al quale si fa in genere riferimento. Definito il periodo, i parametri termici dinamici non dipendono dalle condizioni al contorno ma dalle caratteristiche fisiche dell'elemento costruttivo (Scaramella et al., 2009), quindi dalla trasmittanza e dalla capacità termica della parete; tuttavia sono legati anche all'ordine di successione degli strati, poiché la risposta inerziale aumenta all'aumentare della massa e del calore specifico e diminuisce al crescere della conduttività. Infatti materiali leggeri, ma termicamente isolanti, raggiungono buoni risultati di trasmittanza termica periodica ma possono essere meno efficaci nell'attenuare l'onda termica, se non hanno un elevato calore specifico.

Nell'architettura storica, gli elementi verticali d'involucro rispettano molto facilmente il limite di massa superficiale di $230 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ previsto dalla legislazione in materia di efficienza energetica. Eppure, com'è noto, le murature sottili non sono in grado di garantire condizioni soddisfacenti di benessere interno, mentre è possibile progettare pareti leggere con massa superficiale anche nettamente inferiore a quella minima ma in grado di soddisfare le prescrizioni di trasmittanza termica periodica e buone condizioni interne di benessere (Leccese e Tuoni, 2009).

Il limite di massa superficiale non è sufficiente in quanto non rende conto del comportamento dinamico del componente (Mammi, 2007). Il limite sulla trasmittanza termica periodica è ritenuto più significativo proprio perché, caratterizzando il comportamento dinamico dei componenti, riesce a valutare adeguatamente anche le prestazioni di componenti d'involucro leggeri, che nelle strutture storiche hanno un esempio rilevante nelle coperture lignee.

La normativa nazionale non pone limiti per l'attenuazione e lo sfasamento. Alcune indicazioni possono rintracciarsi nel Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2009, "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici", che ha definito cinque classi prestazionali, da ottima (I) a mediocre (V), per esprimere la qualità termica estiva dell'edificio. Questa può essere valutata secondo due metodi, l'uno basato sull'indice di prestazione estiva dell'involucro della UNI/TS 11300-1:2008, l'altro sui parametri qualitativi di sfasamento e attenuazione.

Sfasamento (h)	Attenuazione	Prestazioni	Qualità prestazionale
$S > 12$	$f_a < 0,15$	Ottime	I
$12 \geq S > 10$	$0,15 \leq f_a < 0,30$	Buone	II
$10 \geq S > 8$	$0,30 \leq f_a < 0,40$	Medie	III
$8 \geq S > 6$	$0,40 \leq f_a < 0,60$	Sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,60 \leq f_a$	Mediocri	V

Tabella 3.8. Classificazione qualitativa degli edifici in base alle caratteristiche di attenuazione e sfasamento. Rielaborata da ANIT (2013b).

Nel caso di pareti opache, soddisfatti i requisiti per la trasmittanza termica in regime stazionario definiti nel decreto legislativo 192/2005, lo sfasamento e l'attenuazione relativi a prestazioni "ottime" fanno sì che la trasmittanza termica periodica sia sempre inferiore al limite normativo, mentre i valori corrispondenti a prestazioni "sufficienti" e "mediocri" impediscono di rispettare tale requisito (Leccese e Tuoni, 2009). Un componente edilizio, infatti, ha un comportamento tanto migliore in regime dinamico quanto minore è il suo fattore di attenuazione (Scaramella et al., 2009); a tal proposito Salani (2008) riporta, distinti per zona climatica, alcuni valori di attenuazione ritenuti ragionevoli per soddisfare i limiti di trasmittanza e di trasmittanza periodica: per la zona B, dunque anche per Palermo, i valori consigliati sono rispettivamente 0,29 per le coperture, 0,17 per le pareti e 0,16 per i solai contro terra. Per lo sfasamento dell'onda termica, invece, il valore ottimale non può essere determinato in modo assoluto, in quanto rappresenta il numero di ore necessarie perché il calore in eccesso possa essere smaltito, per lo più attraverso la ventilazione notturna. Questo valore è in genere individuato fra 12 e 14 ore, almeno per le condizioni climatiche dell'Italia settentrionale (Scaramella et al., 2009).

Diversamente dalla trasmittanza termica in condizioni stazionarie, non esiste una procedura normata di misura in laboratorio o in opera dei parametri termici dinamici. Per calcolarli si può ricorrere al metodo delle ammettenze definito dalla norma UNI EN ISO 13786: ogni strato dell'elemento costruttivo è rappresentato da una matrice di numeri complessi, detta matrice di trasferimento termico, i cui elementi dipendono dalla massa volumica, dallo spessore, dal calore specifico e dalla conducibilità termica del materiale che compone il singolo strato; dal prodotto fra le matrici degli strati risulta la matrice di trasferimento termico dell'elemento costruttivo, da cui si estrapolano trasmittanza termica periodica, attenuazione e sfasamento. I parametri dinamici possono essere calcolati anche con metodi agli elementi finiti o attraverso un'analogia elettrica. In tutti questi casi, però, resta l'incertezza correlata alle proprietà fisiche dei materiali.

Scaramella et al. (2009) hanno proposto un protocollo per determinare in laboratorio le grandezze termiche dinamiche di un componente edilizio. Questo, posto in una camera climatica, è soggetto a una variazione ciclica giornaliera di temperatura per almeno cinque giorni; durante la prova si misurano entrambe le temperature superficiali del campione e, dal lato non sollecitato, il flusso termico.

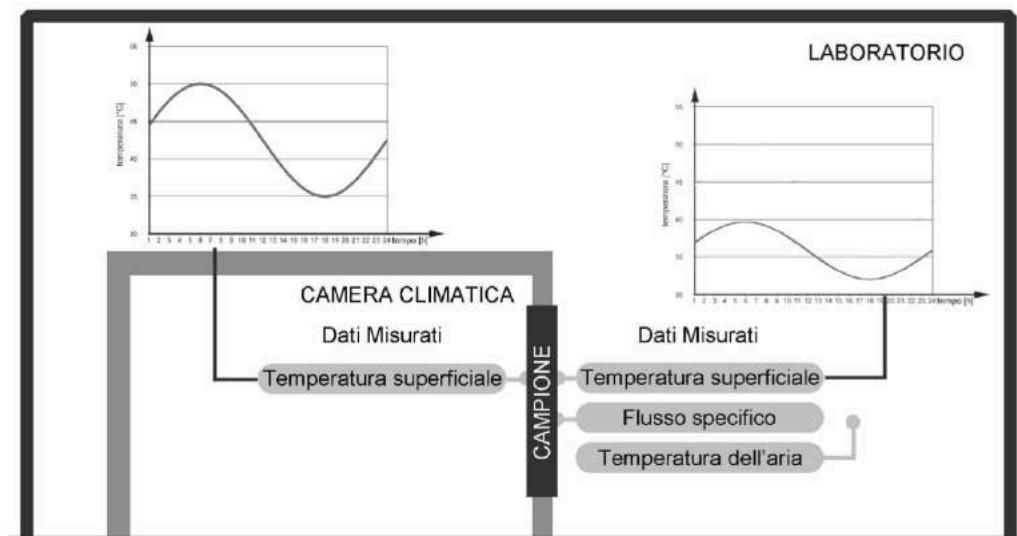


Figura 3.4. Schema dell'apparato sperimentale proposto da Scaramella et al. (2009) per determinare la trasmittanza termica periodica attraverso prove di laboratorio (Scaramella et al., 2009).

Dai dati misurati si può ricavare una “conduttanza periodica”, così definita perché, in analogia a quella in regime stazionario, non tiene conto dell’influenza degli strati liminari: peraltro l’impossibilità di aggiungere quest’ultima ai valori desunti dalle misure rende la trasmittanza periodica un valore teorico non valutabile sperimentalmente.

Attraverso il metodo delle medie progressive, inoltre, dai dati misurati è possibile ricavare anche la conduttanza in regime stazionario. Il rapporto fra la grandezza dinamica e quella statica è il fattore di attenuazione, ovviamente minore dell’unità. Lo sfasamento, invece, è la distanza temporale fra i picchi delle curve di flusso o di temperatura sulle superfici interna ed esterna del campione; nel metodo proposto, si ricorre alle misure di temperatura perché più affidabili. Se il calcolo dei parametri dinamici è affetto dalla limitata conoscenza delle caratteristiche dei materiali (specialmente la capacità termica), il protocollo di misura è condizionato dalle difficoltà a mantenere costante la temperatura di laboratorio; il risultato è ritenuto comunque più rappresentativo del metodo di calcolo perché mostra il reale comportamento del componente edilizio indagato (Scaramella et al., 2009).

3.3 Gli infissi storici fra trasmissione, ombreggiamento e ventilazione

Il D.P.R. 59 del 2009 ha fissato per la zona climatica B valori massimi di trasmittanza termica di $3,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per gli infissi e di $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per i vetri (con il D.M. 26.06.2015 si impone un limite di $3,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per le chiusure tecniche trasparenti). Tali soglie sono considerate un prerequisito obbligatorio nel protocollo GBC *Historic Buildings* (EA prerequisito 2), mentre CasaClima R richiede per la zona B valori massimi di $1,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per il vetro (U_g) e $1,60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per il telaio (U_t)¹⁶. La trasmittanza termica di un infisso è il risultato dei contributi del telaio, del vetro e, nel caso di vetrocamera, dei distanziatori fra le lastre, secondo la nota relazione (UNI EN ISO 10771-1) $U_w = [\Sigma(A_g \cdot U_g) + \Sigma(A_f \cdot U_t) + \Sigma(I_g \cdot \Psi_g)] \cdot (\Sigma A_g + \Sigma A_t)^{-1}$.

Per misurare la trasmittanza termica del vetro, ma non del telaio e del serramento nel suo insieme, alcune fonti di letteratura (Baker, 2010 e Lucchi, 2012) indicano la procedura della norma ISO 9869:1994. Sebbene questa faccia riferimento agli elementi opachi, Lucchi (2012) evidenzia come la ridotta inerzia termica del vetro renda il metodo adatto allo scopo e suggerisce di svolgere più determinazioni, condotte per un periodo di almeno settantadue ore (cfr. par. 3.2.2). Invece la trasmittanza dell'infisso può essere determinata in laboratorio con il metodo (*hot box*) definito dalla norma EN ISO 12567-1. Nell'ambito dell'architettura storica, a corredo di una sperimentazione svolta in camera climatica su alcuni serramenti (Baker, 2010) per analizzarne le prestazioni attuali e i miglioramenti conseguibili, questa misura di laboratorio è stata svolta su una finestra ad ante saliscendi¹⁷ e ha fornito un risultato di $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, prossimo al generico valore di $4,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ che alcune pubblicazioni inglesi (Historic England, 2015) suggeriscono per gli infissi storici in legno a vetro singolo.

Le prestazioni termiche dei serramenti in opera si ricavano essenzialmente dal calcolo. La trasmittanza del vetro si determina secondo la norma UNI EN 673:2011 e dipende dalla conduttanza del materiale (quindi dalla conducibilità termica e dallo spessore) e dai coefficienti di trasferimento del calore interno ed esterno. Per questi ultimi la norma indica valori *standard* di 25 e $7,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (più noti sono i reciproci, 0,04 e $0,13 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$); al vetro assegna invece il valore $1,0 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$, concorde con la conducibilità termica di $1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ che si rintraccia nella UNI EN ISO 10077-1:2007 e nella UNI 10351:2015. A una lastra singola dello spessore di 4 mm corrisponde dunque una trasmittanza termica di $5,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, valore che le norme UNI EN ISO 10077-1:2007 e UNI/TS 11300-1:2014 riportano senza riferimento allo spessore. Le stesse norme forniscono valori di trasmittanza termica per numerosi tipi di vetri doppi e tripli, al variare dello spessore delle intercapedini e del gas in queste contenuto.

Nella produzione corrente dei telai lignei, che sono quelli propri della tradizione storica, è frequente l'utilizzo sia di essenze "tenere" sia di quelle "dure", in forma di legno massello e soprattutto lamellare; sebbene siano disponibili telai di spessore inferiore a 56 mm (Paganin, 2009), da numerose schede di prodotto si evince che spessori nominali molto diffusi, almeno in ambito nazionale, sono 68 mm, 78 mm, 92 mm (quest'ultimo volto a conseguire le più elevate prestazioni d'isolamento termico). Alcune dichiarazioni di prodotto riportano poi, per telai spessi 68 mm, una trasmittanza termica di telaio U_f di $1,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ nel caso di legni duri quali il rovere e $1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per essenze quali pino, larice e mogano. La UNI/TS 11300-1, distinguendo essenze tenere e dure, fornisce valori di trasmittanza termica per telai lignei di spessore da 50 a 90 mm (vedi tab. 3.9).

	TRASMITTANZA TERMICA			
	[$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]			
	50 mm	60 mm	70 mm	90 mm
Legno duro (rovere, mogano, iroko)	2,2	2,0	1,9	1,6
Legno tenero (pino, abete, larice, douglas, hemlock)	2,0	1,8	1,6	1,3

Tabella 3.9. Valori di trasmittanza termica per telai lignei dalla norma UNI/TS 11300-1:2014.

Sempre dividendo i legni duri ($\rho=700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda= 0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) dai teneri ($\rho=500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda= 0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$), la norma ISO 10077-1 riporta graficamente la relazione fra lo spessore del telaio e la trasmittanza. I valori che se ne ricavano, relativi a telai in legno o misti in legno e metallo e riferiti a un contenuto di umidità del 12%, corrispondono a quelli della UNI/TS 11300-1 per spessori di 50 mm, ma sono maggiori negli altri casi.

La parte 2 della ISO 10077, che tratta dei metodi numerici per il calcolo della trasmittanza dei telai, in modo più approfondito distingue le specie legnose in quattro gruppi, cui attribuisce conducibilità termica da $0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ a $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (vedi tab. 3.).

Specie legnosa	Conducibilità termica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Picea sitchensis</i> , <i>Pinus contorta</i> , <i>Thuja plicata</i>	0,11
<i>Khaya spp.</i> , <i>Larix spp.</i> , <i>Larix decidua</i> , <i>Larix eurolepis</i> , <i>Larix gmelina</i> , <i>Larix oocarpa</i> , <i>Picea glauca</i> , <i>Parashorea spp.</i> (seraya bianca), <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Shorea spp.</i> (meranti rosso chiaro), <i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Terminalia ivorensis</i> , <i>Tsuga heterophylla</i>	0,13
<i>Entandrophragma cylindricum</i> , <i>Entandrophragma utile</i> , <i>Eucalyptus delegatensis</i> , <i>Eucalyptus obliqua</i> , <i>Eucalyptus regnans</i> , <i>Heritiera spp.</i> , <i>Heritiera utilis</i> , <i>Heritiera densiflora</i> , <i>Milicia excelsa</i> , <i>Milicia regia</i> , <i>Ocotea rubra</i> , <i>Shorea spp.</i> , <i>Tectona grandis</i> , <i>Tieghemella heckelii</i>	0,16
<i>Azelia spp.</i> , <i>Calophyllum spp.</i> , <i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Eucalyptus saligna</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus uro-grandis</i> , <i>Intsia bijuga</i> , <i>Intsia palembanica</i> , <i>Parashorea spp.</i> , <i>Pometia pinnata</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i>	0,18

Tabella 3.10. Conducibilità termica di varie specie legnose, dalla norma ISO 10077-2:2012.

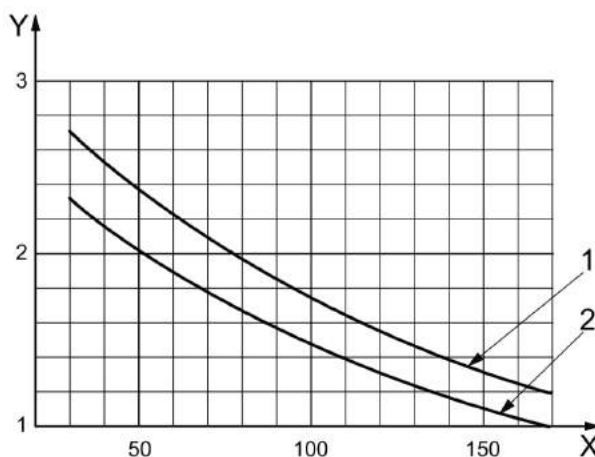


Figura 3.5. Trasmittanza termica (in ordinata, in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$) dei telai lignei o misti in legno e metallo al variare dello spessore (in ascissa, in mm). La curva 1 riguarda i legni duri, la 2 quelli teneri. Dalla norma ISO 10077-1:2006.

Anche nella norma UNI 10351:2015, la conduttività utile di calcolo dei legnami¹⁸ è distinta per specie legnosa, specificando se il flusso termico sia perpendicolare alle fibre, come nel caso degli infissi, o ad esse parallelo; al crescere della massa volumica aumen-

ta la conducibilità, da $0,120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per l'abete ($\rho=450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a $0,22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per la quercia ($\rho=850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); per le altre specie si indica di procedere per interpolazione proprio in funzione della massa volumica. Valori del tutto confrontabili sono riportati dalla UNI EN ISO 10456:2008 per legnami di massa volumica compresa fra 450 e $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

	Massa volumica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Conducibilità termica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Abete	450	0,12
Pino	(flusso perpendicolare alle fibre)	550
	(flusso parallelo alle fibre)	550
Acero	(flusso perpendicolare alle fibre)	710
	(flusso parallelo alle fibre)	710
Quercia	(flusso perpendicolare alle fibre)	850
	(flusso parallelo alle fibre)	850

Tabella 3.11. Conducibilità termica per varie specie legnose con un contenuto medio di umidità del 15%. Da UNI 10351:2015.

Secondo le fonti d'archivio riportate da Culotta, La Franca e Scianna (1998), le specie più impiegate negli infissi storici palermitani erano il castagno per i telai e l'abete (tavole "veneziane") per le specchiature. Abbastanza diffuso era anche il legno di pino, poco frequente perché pregiato quello di noce. Per ambienti rappresentativi è attestato anche l'impiego dell'acero (Giovanetti, 1997). Se in buona parte gli infissi di fattura storica presenti nel centro storico di Palermo sono in castagno¹⁹ (Culotta et al., 1998), molti sono quelli ottocenteschi realizzati con legno di pino o di abete. Dalla consultazione di alcuni manuali di merceologia di inizio Novecento (Bianchi, 1914 e Romegialli, 1919) non si sono tuttavia rintracciate informazioni più dettagliate sulle essenze allora impiegate.

Per gli infissi palermitani descritti da Culotta et al. (1998) e da Giovanetti (1997) lo spessore delle ante mobili è compreso fra 40 mm e 56 mm; quello del telaio fisso è in alcuni casi paragonabile, ma in presenza di persiane può essere sensibilmente maggiore e superare i 100 mm. La proporzione fra la parte opaca e quella trasparente del serramento, poi, è molto superiore rispetto al 20% ipotizzato nella tabella con cui la norma UNI/TS 11300-1:2014 fornisce la trasmittanza del serramento in base a quelle del vetro e del telaio. Alcuni dati utili per gli edifici storici sono contenuti nel fascicolo italiano del progetto TABULA (Corrado et al., 2014), che riporta valori di $3,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $1,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per le porte in legno, $4,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per le finestre con vetro singolo e il fattore solare per porte e infissi lignei al variare delle caratteristiche del vetro, ma senza specificare l'essenza del legno, le dimensioni del telaio e la sua estensione rispetto all'area del serramento.

Gli infissi, com'è noto, contribuiscono sensibilmente agli apporti interni di energia solare, che, se riducono il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale, tuttavia aumentano il rischio di surriscaldamento durante il periodo estivo. Della radiazione solare incidente sulle superfici vetrate, una quota viene trasmessa direttamente all'interno,

un'altra è riflessa e il resto, dopo essere stato assorbito, è irraggiato in parte verso l'ambiente esterno e in parte dentro l'edificio. La radiazione che complessivamente giunge all'ambiente interno è espressa dal fattore di trasmissione solare diretta e da quello di assorbimento, che insieme costituiscono il fattore solare, o trasmittanza di energia solare totale, g , che varia fra 0 e 1 e dipende dal numero di lastre, dallo spessore del vetro e dall'eventuale presenza di rivestimenti superficiali. La norma UNI TS 11300-1:2014 ne fornisce il valore per alcuni tipi di vetro, per quello singolo 0,85. Un coefficiente alternativo al fattore solare è indicato con la sigla SHGC, *Solar Heat Gain Coefficient* e il valore comunemente adoperato per i vetri singoli è 0,81.

Per regolare l'ingresso della radiazione solare e i rischi di surriscaldamento, nell'architettura storica palermitana i sistemi di ombreggiamento tradizionali sono gli scuretti e le persiane, spesso presenti contestualmente (Culotta et al., 1998). Com'è noto, le seconde incidono maggiormente sulla riduzione del riscaldamento interno, in quanto intercettano la radiazione solare prima che questa raggiunga la superficie vetrata. Per determinarne gli effetti termici e ottici sugli infissi si fa riferimento al metodo di calcolo della norma UNI EN ISO 15099:2003. Nella UNI/TS 11300-1 sono comunque riportati alcuni valori tabellari sia per il contributo dei dispositivi di ombreggiamento alla riduzione della trasmittanza termica del serramento, sia per quello alla riduzione degli apporti solari. Nel primo caso, la norma fornisce valori di resistenza termica addizionale specifici per chiusure lignee di spessore da 25 a 30 mm. Nel secondo caso, invece, fa riferimento soltanto al contributo di tende esterne e interne, distinte anche per colorazione. Quest'ultimo aspetto permette di evidenziare, nuovamente, l'importanza della finitura e del colore dei dispositivi di ombreggiamento, che ne determinano le proprietà di assorbimento della radiazione solare.

La proporzione tra le parti trasparente e opaca dell'involucro non influisce solo sulla qualità luminosa degli ambienti interni ma anche sulle sue prestazioni energetiche. Gli infissi, infatti, determinano gli apporti solari interni e, anche quando hanno elevate prestazioni, restano una parte debole dell'involucro, nella quale si concentrano gli scambi di calore con l'ambiente esterno. Il rapporto fra involucro opaco e trasparente è considerato un aspetto di rilievo per valutare il comportamento energetico degli edifici (Berg, 2015) e il suo basso valore rispetto all'architettura contemporanea, dettato da ragioni statiche e compositive, è spesso annoverato fra le evidenze di come il costruito storico venisse adattato alle condizioni ambientali locali. D'altro canto, tuttavia, il rispetto dei rapporti di finestratura prescritti dalle norme igienico-sanitarie (D.M. del 5 luglio 1975) richiederebbe in molti casi lo stravolgimento dei caratteri dell'edificio storico.

Al contempo, il numero, l'estensione e la disposizione delle aperture, insieme alla loro relazione con la distribuzione interna, determinano le possibilità di ventilazione naturale degli edifici (Grosso, 2011), strategia fondamentale nel controllo della qualità ambientale interna in clima temperato e caldo. Mammi (2007) sottolinea infatti come un involucro edilizio possa rispettare appieno i requisiti termici previsti ma, specie in estate, offrire condi-

zioni termiche interne inaccettabili. Rileva, dunque, il ruolo fondamentale delle aperture, che non contribuiscono soltanto con la trasmittanza termica, ma soprattutto con la ventilazione naturale, necessaria non solo per garantire adeguate condizioni igieniche e prevenire le malattie connesse all'edificio, ma anche per assicurare il benessere termico interno. Su ciò, tuttavia, ha anche influenza la permeabilità all'aria della costruzione.

3.4 Connessioni e permeabilità all'aria

Consumi energetici consistenti, rischi elevati di degrado degli elementi tecnici e di decadimento del benessere interno, connessi soprattutto alla proliferazione di muffe, sono legati alla presenza di ponti termici, cioè vie preferenziali agli scambi di calore costituiti da discontinuità geometriche o materiche dell'involucro, per lo più puntuali o lineari. I ponti termici dovuti alla conformazione geometrica dei componenti comprendono tipicamente gli spigoli murari nelle pareti e le linee di compluvio e displuvio nelle coperture inclinate. Quelli di materia, invece, sono legati a un cambiamento delle proprietà termiche dei componenti, ad esempio in corrispondenza dei travetti in ferro per i solai di copertura, degli architravi metallici, delle mensole dei balconi, ma anche di elementi di consolidamento quali le catene. I ponti termici di materia possono derivare anche da una sensibile riduzione di spessore del componente: nel costruito storico, ciò può verificarsi in corrispondenza delle canne fumarie, di sistemi di smaltimento delle acque o altre canalizzazioni ricavate nella struttura muraria, nelle nicchie delle finestre, agli appoggi delle travi sulla struttura verticale. La loro individuazione, spesso, richiede lo svolgimento di indagini termografiche.

Nell'architettura storica, i rischi di degrado e i consumi energetici legati ai ponti termici, in particolare alle connessioni fra gli elementi d'involucro, discendono soprattutto dai moti convettivi legati alla loro scarsa tenuta all'aria. Questa, per un involucro edilizio, è determinata dalla permeabilità dei materiali, dalle caratteristiche costruttive degli elementi tecnici, dal loro stato di conservazione (presenza di lesioni e mancanze) e appunto dalle connessioni puntuali e lineari che li legano.

Negli edifici di nuova costruzione, che tendono a un modello di consumo energetico minimo, si mira a conseguire per l'involucro un'elevata ermeticità. Essa previene perdite di calore nel periodo invernale e l'ingresso di aria calda in quello estivo, riducendo così l'energia necessaria per la climatizzazione degli ambienti. Inoltre, limita i rischi di degrado connessi all'umidità, la cui saturazione all'interno degli edifici non avviene solo per via del trasporto all'interno dei singoli elementi edilizi, ma anche per fenomeni convettivi, cioè per il trasporto dovuto alla permeabilità dei componenti. L'ermeticità dell'involucro, che favorisce anche le prestazioni acustiche dell'edificio, incide inoltre sulla qualità ambientale interna, ostacolando le correnti d'aria e il *discomfort* che queste provocano e impedendo l'ingresso di inquinanti esterni.

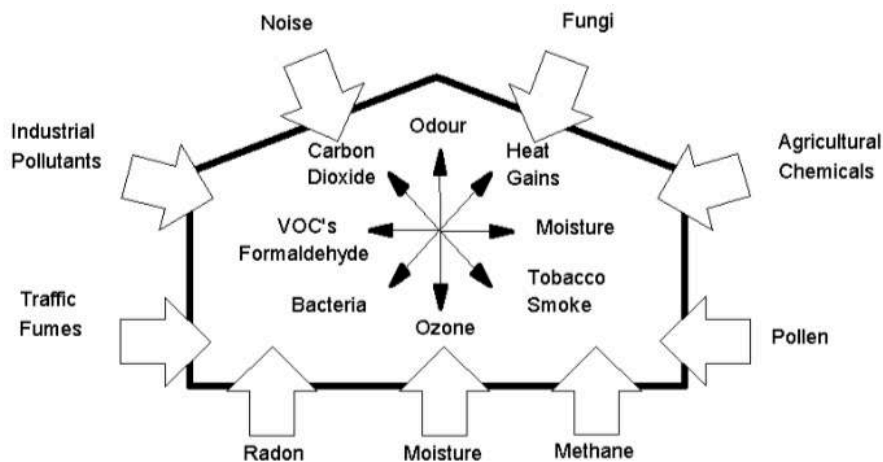


Figura 3.6. Fonti d'inquinanti per un edificio. Da Orme e Leksomono (2002).

Un'elevata tenuta all'aria, tuttavia, può avere effetti deleteri sulla qualità ambientale interna e sulla salute delle persone se non si accompagna a un adeguato ricambio d'aria. Questo è necessario per evitare sia l'accumulo di sostanze inquinanti negli ambienti confinati, provocato dagli occupanti, dai macchinari, dagli stessi materiali edili, sia un tasso elevato di umidità interna, che dovrebbe invece mantenersi fra il 30% e il 70%.

Poiché un'elevata ermeticità può essere molto utile nel conseguire una significativa efficienza energetica negli edifici, in generale si ritiene necessario abbinarle la ventilazione meccanica, che garantisca i necessari ricambi d'aria senza ledere le condizioni interne di benessere termico. D'altro canto, però, è opportuno che gli interventi di miglioramento prestazionale siano progettati in modo da garantire che, finché possibile, che sia l'edificio in sé, senza ausilio impiantistico e con un adeguato comportamento degli utenti, a garantire il controllo delle condizioni interne di igiene e benessere.

Il particolare comportamento igrometrico degli edifici storici, caratterizzato da scambi significativi di acqua e vapore per capillarità, diffusione e igroscopicità, induce a ritenere che le consistenti infiltrazioni d'aria che li connotano, e che limitano sensibilmente le prestazioni energetiche, assicurino tuttavia in parte i ricambi d'aria necessari a contenere i rischi di degrado connessi all'umidità. Il ricambio d'aria, però, dipende dalla pressione effettiva del vento e dal gradiente di temperatura; quindi anche in edifici storici a tenuta molto scarsa, nei quali differenze di pressione contenute possono determinare infiltrazioni d'aria rilevanti, in assenza di vento può aversi un ricambio inadeguato accanto a elevati consumi energetici (Peper, S. et al. in Troi e Bastian, 2014).

Per valutare il tasso di ventilazione, attraverso i modelli di calcolo disponibili, è essenziale conoscere le caratteristiche di tenuta all'aria dell'involucro edilizio (Orme e Leksomono, 2002). A tal fine sono necessari valori di permeabilità per gli infissi, le murature, i solai, per i controsoffitti e le coperture, per le connessioni fra gli elementi tecnici, per i camini, per i percorsi degli impianti.

Orme e Leksmono (2002) hanno raccolto in proposito, insieme a raccomandazioni e prescrizioni vigenti in vari Paesi, anche una ricca serie di dati indicativi di riferimento, costituiti da coefficienti normalizzati di flusso (C) ed esponenti di flusso (n), attraverso i quali è possibile caratterizzare la tenuta all'aria di un'apertura, intendendo come tale anche le fessure e le intercapedini all'interfaccia fra due elementi tecnici (cfr. par. 7.3.4).

La permeabilità all'aria di un edificio può essere espressa mediante il volume d'aria che, nell'unità di tempo, ne attraversa l'unità di superficie per effetto di una differenza di pressione di 50 Pa, e si misura in $\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$ ovvero $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$. In alternativa può adoperarsi il parametro n_{50} , che esprime il numero di ricambi d'aria che avvengono sempre per effetto di una differenza di pressione di 50 Pa. I due parametri sono legati dall'area superficiale esterna dell'involucro e dal volume interno riscaldato, in quanto $n_{50} = P_{\text{erm}} \cdot A \cdot V^{-1}$ (Pickles et al., 2010).

Il riferimento a una pressione di 50 Pascal discende dalla procedura di misurazione della tenuta all'aria dell'involucro edilizio, descritta dalla norma UNI EN 13829 e nota come *blower door test*. Il metodo consiste nell'applicare fra l'edificio, o una sua parte, e l'ambiente circostante una differenza di pressione di 50 Pa, volta a limitare l'influenza delle condizioni atmosferiche esterne sulla prova. Questa è condotta sia in pressione sia in depressione ed è corredata anche da analisi termografiche e anemometriche.

Il ricorso a tale procedura di prova, soprattutto nell'ambito di studi scientifici, si sta affermando anche per il patrimonio architettonico. È oggi disponibile una letteratura abbastanza estesa sul suo impiego anche all'architettura storica, sia nelle applicazioni su abitazioni (Pickles et al., 2010), sia al patrimonio monumentale civile ed ecclesiastico (Trois e Lucchi, 2013)²⁰.

Il numero di ricambi d'aria che si verificano a pressione atmosferica, n, è legato alla localizzazione, all'orientamento e alla geometria dell'edificio ma dipende molto dalle condizioni esterne di pressione, temperatura e velocità del vento. Questo tasso può essere ricavato da quello a 50 Pa attraverso la relazione empirica $n = 0,05 \cdot n_{50}$ (Pickles et al., 2010), riportata anche dalla UNI EN ISO 13789:2008.

Nella norma UNI/TS 11300-1:2014, il coefficiente di ricambio d'aria è adoperato per valutare gli effetti della ventilazione sul fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva e invernale. Per calcolarlo si considera una "portata minima di progetto di aria esterna", $q_{\text{ve},0}$, che dipende dal numero nominale di occupanti e dalla superficie netta dei locali (esclusi cucine, bagni, corridoi e locali di servizio). Per gli edifici residenziali, la portata minima di progetto può essere ricavata invece dalla formula $q_{\text{ve},0} = n \cdot V \cdot 3600^{-1}$, in cui V è il volume netto della zona in m^3 e per il tasso di ricambio d'aria può adoperarsi il valore $0,5 \text{ h}^{-1}$. La norma, inoltre, riporta i valori di ricambio d'aria per costruzioni a permeabilità bassa, media o alta, in funzione del numero di facciate e dell'eventuale presenza di schermature. I valori sono distinti per destinazione residenziale e non residenziale e in base al numero di unità abitative. Alcune fonti (Lanzoni, 2012) invece suggeriscono, per gli edifici abitativi privi di sistema di ventilazione meccanica, che il numero di ricambi

d'aria sia $n=0,2+0,04 \cdot t_e$, detta t_e la temperatura esterna media mensile riportata, per le varie località italiane, dalla UNI 10349.

3.5 L'edificio e il suo contesto

Nella legislazione italiana sull'efficienza energetica, per una data zona climatica il limite per il coefficiente medio globale di scambio termico è calcolato in base al rapporto di forma dell'edificio, S/V , cioè al rapporto fra la superficie che delimita il volume lordo riscaldato verso l'esterno, o verso spazi non riscaldati, e il volume stesso (D.M. 26 giugno 2015).

RAPPORTO DI FORMA (S/V)	ZONA CLIMATICA					
	Zona climatica	A e B	C	D	E	F
$S/V \geq 0,7$		0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
$0,7 > S/V \geq 0,4$		0,63	0,60	0,58	0,55	0,53
$0,4 > S/V$		0,80	0,80	0,80	0,75	0,70

Tabella 3.12. Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico secondo il D.M. 26.06.2015.

In effetti le prestazioni energetiche e ambientali di un edificio non dipendono soltanto dai caratteri dei componenti d'involucro ma anche da quelli della costruzione nel suo insieme. Il rapporto di forma ne esprime la compattezza e rende conto dell'entità degli scambi termici che avvengono per trasmissione e ventilazione. Esso dipende dalla consistenza dell'edificio, ma è influenzato anche dalla sua morfologia e dalla distribuzione interna, ad esempio dalla presenza di porticati, logge e cortili. A questi ultimi, in particolare, gli studi sull'architettura bioclimatica (Grosso, 2011) attribuiscono un ruolo significativo nel garantire le possibilità di ventilazione naturale nelle aree a clima temperato e caldo.

Nell'architettura storica palermitana (cfr. cap. 6), la presenza del cortile, elemento ricorrente delle costruzioni monumentali ma anche di una parte di quelle minori, è legata alla variegata morfologia del tessuto urbano. Ciò è evidente nell'architettura dei palazzi aristocratici: la forma compatta che in genere gli si attribuisce trova frequenti eccezioni, soprattutto lungo le cortine monumentali della città. Anche tra le costruzioni elencate, in cui i caratteri ricorrenti sono più evidenti, i frequenti cortili e piccole chiostrine condivisi si contrappongono all'assenza di spazi aperti per molti altri edifici, determinando scarse condizioni di benessere che, ad esempio, hanno portato alla proposta di recupero di Giuffré (Giuffré e Carocci, 1999). Al ruolo dei cortili si aggiungono anche quelli di molti spazi, quali gli androni e i vani scala, gli spazi sotto tetto e i locali terranei non riscaldati, i seminterrati, che funzionano da tampone per le variazioni di temperatura. Non a caso la norma UNI EN ISO 6946:2008 consente di considerare gli spazi interni non riscaldati come resistenze termiche aggiuntive.

Il rapporto di forma, ovviamente, è legato anche all'aggregazione di un edificio a quelli limitrofi, che condiziona notevolmente l'estensione della superficie esposta verso spazi non climatizzati. Come sottolineano alcune fonti (Grosso, 2011 e Ambrogio e Zuppiroli, 2013), la compattezza dell'architettura dei centri urbani, soprattutto di quella elencata, se da un lato incide negativamente sulla qualità luminosa di queste costruzioni, dall'altro favorisce sia la conservazione del calore nel periodo invernale, sia la protezione dell'ambiente interno dal surriscaldamento estivo.

L'aggregazione degli edifici e la densità del tessuto in cui sono inseriti influenzano sensibilmente le possibilità della ventilazione naturale, e ciò non solo attraverso il numero di facci. L'orientamento delle costruzioni e la densità del tessuto, infatti, influenzano la direzione e la velocità del vento e quindi, insieme alla distribuzione interna, condizionano la reale entità della ventilazione naturale. Non a caso la UNI/TS 11300-1:2014, riprendendoli dalla UNI EN ISO 13789, per calcolare le portate d'aria di ventilazione naturale fornisce dei coefficienti di esposizione dell'edificio al vento basati sul numero di facciate esposte all'esterno e sulla schermatura prodotta da piante e altre costruzioni.

	SCHERMATURA		ESPOSIZIONE	
	Classe	Descrizione	Più di una facciata esposta	Solo una facciata esposta
e	Nessuna schermatura	Edifici in aperta campagna, grattacieli nel centro città	0,10	0,03
	Media schermatura	Edifici in campagna con alberi o con altri edifici nelle vicinanze, periferie	0,07	0,02
	Fortemente schermato	Edifici di media altezza nei centri cittadini, edifici in mezzo a foreste	0,04	0,01
f	Tutte le classi di schermatura	Tutti gli edifici	15	20

Tabella 3.13. Coefficienti di esposizione al vento "e" ed "f" in funzione della schermatura e dell'esposizione dell'edificio nei confronti del vento. Da UNI/TS 11300-1:2014.

L'attenzione all'ambiente circostante nel determinare la qualità dello spazio costruito caratterizzava già nel XIX secolo gli studi sull'igiene delle costruzioni, la progettazione architettonica e quella alla scala urbana (Vinci, 2003 e 2013). L'influenza del contesto sulle prestazioni energetiche dell'edificio è oggetto di varie ricerche, che ne analizzano l'impatto sull'ombreggiamento e sugli apporti solari, sulla qualità luminosa, sul comportamento degli utenti (Pisello, Taylor e Cotana, 2013), ma anche sulla capacità di assorbimento della radiazione del sole e sull'entità del fenomeno dell'isola di calore. Esprimendo la densità del tessuto come rapporto fra l'altezza di un edificio e la distanza rispetto a quello che lo fronteggia, Pisello et al. (2013) hanno proposto e analizzato su tre edifici della città di Perugia un indice, *Inter-Building Effect*, che esprime le reciproche influenze dei fabbricati come differenza tra i fabbisogni termici per la climatizzazione calcolati modellando la costruzione come a sé stante o all'interno del suo contesto. Gli autori eviden-

ziano che tale differenza diviene significativa quando il rapporto h/d raggiunge 1,5 e che tessuti densi come quelli storici possono determinare in estate una riduzione di temperatura operante interna sino a $3,5^{\circ}\text{C}$.

3.6 Diagnostica per la conservazione e la qualità ambientale interna

Le molte incognite legate all'individuazione dei ponti termici, alla corretta quantificazione dei loro effetti e delle perdite per infiltrazione, insieme alle incertezze sulla caratterizzazione termica e igrometrica dei componenti tecnici delle costruzioni storiche, acuiscono i problemi di una valutazione attendibile delle prestazioni energetiche di questi edifici, necessaria per individuarne gli aspetti critici e le soluzioni più opportune di miglioramento. Per ovviare a tali difficoltà, Calzolari, Andreotti e Davoli (2013) hanno esaminato la possibilità di applicare agli edifici storici un metodo di rilievo strumentale, denominato *co-heating test*, che consente una determinazione sintetica delle prestazioni energetiche. Il metodo misura lo scambio termico verso l'esterno di una costruzione non occupata, mantenuta a temperatura costante, in genere 25°C , mediante un riscaldamento elettrico con stufe; l'elevata temperatura interna mira a garantire una differenza con l'esterno abbastanza consistente, intorno a 10°C , ed è mantenuta per un tempo compreso fra una e tre settimane. Il fabbisogno termico giornaliero dell'edificio è ottenuto misurando l'energia elettrica consumata quotidianamente per mantenere le condizioni di prova. In tal modo è possibile determinare il coefficiente globale di scambio termico, che tiene conto della geometria dell'edificio e delle sue caratteristiche materiche e costruttive. Tuttavia, il metodo fornisce risultati sintetici, che rendono conto solo delle prestazioni complessive dell'edificio.

Peraltro, come evidenzia Fabbri (2013), le prestazioni energetiche degli edifici dipendono, oltre che dalle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro e dalle prestazioni degli impianti di climatizzazione e ventilazione, anche dalla destinazione d'uso e dalle modalità d'occupazione dell'edificio. A tal proposito Fouseki e Cassar (2014) sottolineano come il modo in cui le persone utilizzano un edificio sia spesso più rilevante del tipo di tecnologia di miglioramento energetico adoperata e sottolineano l'importanza di estendere anche al costruito storico studi, al momento diffusi essenzialmente per l'edificato recente, che riguardano il comportamento e le abitudini degli individui in relazione agli interventi di efficienza energetica (ad esempio, in merito alla gestione delle aperture).

Fabbri (2013), del resto, indica l'opportunità di esprimere le prestazioni degli edifici storici soprattutto in termini di soddisfazione del benessere delle persone, che tuttavia entra spesso in conflitto con le esigenze di conservazione del patrimonio culturale. Se, quindi, alcune ricerche propongono la definizione di indici di benessere che coniughino queste esigenze in molti casi contrastanti (Litti, Fabbri, Adenauert e Braet, 2014), dall'altro emerge la necessità di integrare la diagnosi delle prestazioni energetiche dell'edificio, e l'indagine dei numerosi parametri che concorrono a definirla, nel quadro complessivo della valutazione della qualità ambientale interna della costruzione.

Note

¹ Al contempo, proprio nel XIX secolo, la diffusione delle strutture metalliche e di nuove tipologie edilizie, connesse soprattutto alle funzioni pubbliche, inducono una prima tendenza a soluzioni omologate, indipendenti dalle condizioni climatiche locali.

² La conducibilità o conduttività termica è la quantità di energia termica che, nell'unità di tempo, attraversa per conduzione un campione di spessore unitario quando viene applicata una differenza di temperatura pari a 1 K. Si misura in $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

³ La diffusività termica, $a = \lambda \cdot \rho^{-1} \cdot C^{-1}$, misurata in $m^2 \cdot s^{-1}$, rende conto della variazione di temperatura in un punto interno al materiale al variare di quella in superficie; è tanto maggiore quanto più la temperatura interna è sensibile alle variazioni superficiali.

⁴ L'effusività, $b = \lambda^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot C^{0,5}$, misurata in $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-0,5}$, esprime l'influenza del flusso termico superficiale sulla temperatura di superficie, ed è tanto più bassa quanto più la temperatura superficiale è sensibile alla variazione del flusso termico in superficie.

⁵ È una grandezza adimensionale, che indica quanto la resistenza del materiale al passaggio del vapore sia maggiore di quella di uno strato d'aria in quiete di pari spessore, alla stessa temperatura. La permeabilità al vapore è invece la portata di vapore che attraversa un campione di materiale di spessore e area trasversale unitari quando è applicata una differenza di pressione del vapore pari a 1 Pa. Si misura in $g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-1}$.

⁶ L'emissività termica è la frazione di energia irraggiata da un materiale rispetto a quella irraggiata, alla stessa temperatura, da un corpo nero, per il quale è unitaria. Essa è dunque il rapporto fra la radiazione termica emessa dalla superficie e la massima teorica alla stessa temperatura.

⁷ Detta anche *albedo*, la riflettanza solare è la frazione della radiazione solare incidente che è riflessa da una superficie irradiata. Anch'essa è compresa fra 0, per superfici completamente assorbenti, e 1, per quelle perfettamente riflettenti.

⁸ Fanno eccezione i componenti, orizzontali e verticali, che separino unità immobiliari confinanti o che delimitino verso l'ambiente esterno gli spazi non climatizzati. Per essi infatti è stabilita una soglia unica di $0,8 Wm^{-2}K^{-1}$.

⁹ Per altre tipologie d'infissi, come le finestre da tetto, il metodo è descritto dalla UNI EN ISO 12567-2:2006. Invece si adoperano la UNI EN 12412-2:2004 per i telai e la UNI EN 12412-4:2004 nel caso di cassonetti per chiusure avvolgibili. Per le pareti, infine, si adopera anche il "metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia" indicato dalla UNI EN ISO 8990:1999.

¹⁰ Fa eccezione la muratura in mattoni pieni a vista (MLP02), per la quale si assume che lo strato interno d'intonaco abbia uno spessore di 1,5 cm.

¹¹ Le resistenze superficiali convenzionali riportate dalla norma per l'interno, R_{si} , e l'esterno, R_{se} , sono rispettivamente 0,10 e 0,04 $m^2K \cdot W^{-1}$ se il flusso è diretto verso l'alto, 0,13 e 0,04 $m^2K \cdot W^{-1}$ se il flusso è orizzontale, 0,17 e 0,04 $m^2K \cdot W^{-1}$ se il flusso è diretto verso il basso.

¹² Si cita ad esempio il condizionatore FLUSSOFAST (<http://www.carlesistrumenti.eu/diagnosi-edilizia/analisi-energetica/termoflussimetri.html>).

¹³ Sono intesi come pesanti gli elementi la cui capacità termica specifica per unità di superficie sia superiore a $20 kJ \cdot m^{-2}K^{-1}$.

¹⁴ Tali prescrizioni valgono, ad esclusione della zona climatica F, per le località in cui il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia $I_{m,s} \geq 290 W \cdot m^{-2}$.

¹⁵ L'attenuazione è il rapporto fra l'ampiezza del flusso termico (o della temperatura) in condizioni dinamiche e quella corrispondente in regime stazionario, mentre lo sfasamento è il ritardo con il quale le oscillazioni termiche esterne si manifestano sulla superficie interna dell'elemento indagato.

¹⁶ Nel caso si mantenga in opera il telaio del serramento esistente, il protocollo Casaclima R ammette valori di U_j superiori al limite, purché si aggiunga una guarnizione di tenuta all'aria continua su tutto il perimetro e si rispettino le prescrizioni sulla trasmittanza del vetro, U_g .

¹⁷ Nella finestra indagata, la parte vetrata del serramento costituisce il 55% della superficie complessiva, mentre per il telaio ligneo le dimensioni sono riportate solo parzialmente.

¹⁸ La conduttività utile di calcolo è fornita per contenuti di umidità del 15%. La norma specifica che, per ogni punto percentuale di umidità eccedente, il valore di conducibilità deve essere aumentato dell'1,2%.

¹⁹ Giordano (1998) indica che i valori di massa volumica del castagno, al 12% di umidità, sono compresi fra un minimo di $465 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e un massimo di $695 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, con un valore medio di $580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Per interpolazione lineare fra i valori della norma UNI 10351, a tale massa volumica corrisponde una conducibilità termica di $0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, valore adoperato in varie schede di prodotto. Assumendolo per il calcolo, un telaio di castagno dello spessore di 50 mm risulta avere una trasmittanza di $1,99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, valore che farebbe riferimento a buone condizioni di conservazione dell'infisso.

²⁰ A tal proposito sono significativi gli edifici oggetto di studio nell'ambito del progetto 3ENCULT, per i quali una nutrita documentazione è consultabile presso il sito <http://www.3encult.eu>.

Bibliografia

- Ambrogio, K., & Zuppiroli, M. (2013). *Energia e restauro: Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali*. Milano: Franco Angeli.
- ANIT. (2013a). *Guida Conto energia termico*. Milano: TEP srl.
- ANIT. (2013b). *La legislazione per il risparmio energetico e l'acustica degli edifici*. Milano: TEP srl.
- ANIT. (2013c). *La misura della trasmittanza in opera* (Versione 1 - ottobre 2013). Milano: TEP srl.
- ANIT. (2014). *Guida ANIT: Sostenibilità, risparmio energetico e acustica degli edifici - Marzo 2014*. Milano: TEP srl.
- ANIT. (2015). *Guida ANIT: Efficienza energetica e acustica degli edifici: Ottobre 2015*. Milano: TEP srl.
- Adhikari, R. S., Lucchi, E., & Pracchi, V. (2012). Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings. In J. Reiser, C. Jiménez, & S. Biondi Antúnez de Mayolo (a cura di), *Proceedings of the 28th International PLEA Conference. Convegno tenuto a Lima, Perù, 7-9 novembre 2012*.
- Baker, P. (2009). *Research into the thermal performance of traditional windows: timber sash windows. June 2009. English Heritage*.
- Baker, P. (2010). *Technical Paper 1. Thermal performance of traditional windows. Historic Scotland*.
- Baker, P. (2011). *Technical Paper 10. U-values and traditional buildings. In situ measurements and their comparisons to calculated values. Historic Scotland*.
- Balocco, C. (2006). Thermal and Velocity Field Analysis Inside an Historical Building - The Hall of Two Hundred Case Study. In *Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006. Convegno tenuto a Milano, 14 novembre 2006*.
- Balocco, C. (2007). Investigation on Natural Ventilation Techniques in Historical Buildings. A Case Study in Palermo. In *Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007. Convegno tenuto a Grenoble, Francia, 23-24 ottobre 2007*.
- Balocco, C. (2008). Analysis of Ancient Natural Ventilation Systems inside the Pitti Palace in Florence. In *Proceedings of the COMSOL Conference 2008. Convegno tenuto a Hannover, Germania, 4-6 novembre 2008*.
- Bellotti, A. & Sangalli, P. (2014). La trasmittanza termica e l'edilizia storica: metodi di calcolo a confronto. *Neo-Eubios* 49, 5-14.
- Berg, F. (2015). *Categorising a historic building stock - An interdisciplinary approach* (Master Thesis in Integrated Conservation). Uppsala University, Uppsala, Svezia.
- Bianchi, A. (1914). *Merceologia e Istituzioni Commerciali ad uso delle scuole e del commercio*. Milano: Ulrico Hoepli.
- Browne, D. (2012). *The SPAB Research report 3. The SPAB Hygrothermal Modelling: Interim Report. October 2012*. SPAB. Da <https://www.spab.org.uk/downloads/SPAB%20Hygrothermal%20Modelling%20Report%202031.pdf>
- Calzolari, M., Andreotti, M., & Davoli, P. (2013). Edilizia storica: Un modello sperimentale per valutare le prestazioni energetiche. *Recupero e Conservazione*, 107, art. 14.
- Corrado, V., Ballarini, I., & Corgnati, S. P. (2014). Building Typology Brochure - Italy: Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana. TABULA, EPISCOPE. Da http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/IT_TABULA_TypologyBrochure_POLITO.pdf.
- Culotta, T., La Franca, C., & Scianna, A. (1998). *Gli infissi del centro storico di Palermo. Indagine tipologica*. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per l'Edilizia ed il Risparmio Energetico - Palermo. Quaderno n. 30. Palermo.
- De Santoli, L. (a cura di). (2014). *Efficienza energetica negli edifici storici*. Milano: Editoriale Delfino.

- Fabbri, K. (2013). Energy incidence of historic building: Leaving no stone unturned. *Journal of Cultural Heritage*, 14S, e25-e27.
- Fouseki, K., & Cassar, M. (2014). Editorial: Energy Efficiency in Heritage Buildings - Future Challenges and Research Needs. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 95-100.
- Galbusera, G. (2015). La funzione di equilibrio igroscopico per i materiali da costruzione. *Neo-Eubios*, 52, 28-32.
- Galbusera, G., Panzeri, A., Salani, C., Tuoni, G., Leccese, F., Arengi, A., & Scaramella, I. (2010). *Vol. 5. Prestazioni estive degli edifici*. Milano: TEP srl.
- Giordano, G. (1998). *Tecnologia del legno* (volumi I, II). Torino: UTET.
- Giordano, G. (1997). *Antologia del legno* (volume II). Consorzio Legnolegno s.c.r.l.
- Giovanetti F. (a cura di). (1997). *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Palermo: Flaccovio Editore.
- Giuffrè A., & Carocci C.(1999). *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Roma-Bari: Editori Laterza.
- Grosso, M. (2011). Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato (III edizione). Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.
- Historic England. (2015). *Traditional Windows. Their Care, Repair and Upgrading*. Historic England.
- Heath, N., & Baker, P. (2013). *Technical Paper 20. Slim-profile double-glazing in listed buildings*. Historic Scotland.
- Lanzoni, D. (2012). *Diagnosi e certificazione energetica: prove strumentali sugli edifici* (seconda edizione). Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.
- Leccese, F., & Tuoni, G. (2009). Limitazione sulla massa o sulla trasmittanza dinamica?: Osservazioni sui decreti D.P.R. N.59 del 2 aprile 2009 e D.M. del 26 giugno 2009. *Neo-Eubios*, 29, 20-28.
- Litti, G., Fabbri, K., Adenauert, A., & Braet, J. Simultaneous Heritage Comfort Index (SHCI): Quick scan aimed at the simultaneous indoor environmental comfort evaluation for people and artworks in heritage buildings. In M. López, A. Yáñez, S. Gomes Da Costa, L. Avellà (a cura di). *Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Historic Buildings. Convegno tenuto a Madrid, Spagna, 29-30 settembre 2014* (pp. 478-494). Madrid: Fundación de Casas Históricas y Singulares y Fundación Ars Civilis.
- Lucchi, E. (2009). *Tutela e valorizzazione: Diagnosi energetica e ambientale del patrimonio culturale*. Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli editore.
- Lucchi, E. (2012). *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: termografia e analisi non distruttive, normativa e procedure operative*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Lucchi, E., & Pracchi, V. (a cura di). (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*. Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.
- Mazzurana, M. (2010). Ancora sulla marcatura CE dei serramenti. *Neo-Eubios*, 33,14-21.
- Moye, C. (1980). *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Batiment n. 215. Cahier 1682. Coefficients K des parois des batiments anciens*. Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB).
- Nicol, J.F., & Humphreys, M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34, 563-572.
- Orme, M., & Leksmono, N. (2002). *AIVC Guide 5: Ventilation Modelling Data Guide*. AIVC.
- Paganin, G. (a cura di) (2009). *Serramenti e vetrazioni*. Napoli: Gruppo Editoriale Esselibri - Simone.
- Pagliano, L., Carlucci, S., & Zangheri, P. (2012). *Analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor*. ENEA.
- Panzeri, A. (2008). La misura della trasmittanza in opera: Approfondimento su alcuni aspetti della misura. *Neo-Eubios*, 24, 27-31.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010). *Energy efficiency in historic buildings: Draught proofing windows and doors*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pisello, A. L., Taylor, J. E., & Cotana, F. (2013). Simulating the effect of urban morphology on indoor thermal behavior: an Italian case study. In R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, & M.E. Kuhl (a cura di). *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*.
- Progetto Sun & Wind: Catalogo tipologico degli elementi tipici dell'Architettura Mediterranea*. Palermo:

Comune di Palermo - Assessorato Ambiente.

Raffler, S., Bichlmair, S., & Kilian, R. (2014). *Mounting of Sensors on Surfaces in Historic Buildings. Montaggio di sensori sulle superfici di edifici storici*. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

Ricciardi, P., & Buratti, C. (2015). Thermal comfort in the Frascini theatre (Pavia, Italy): Correlation between data from questionnaires, measurements, and mathematical model. *Energy and Buildings*, 99, 243-252.

Rizzo, G., Beccali, M., & Nucara, A. (2004). Thermal Comfort. *Encyclopedia of Energy*, 6: 55-64. Elsevier.

Romegialli, E. A. (1919). *Trattato sistematico di Merceologia o conoscenza delle merci* (sesta edizione). Paravia.

Salani, C. (2008). Caratteristiche termiche dinamiche. *Neo-Eubios*, 24, 22-26.

Salani, C. (2010). Regime stazionario e regime dinamico. *Neo-Eubios*, 33, 54-57.

Scaramella, I., Arengi, A., & Turla, F. (2009). Comportamento estivo degli edifici: Determinazione della trasmittanza periodica con metodi sperimentali e matematici. *Neo-Eubios*, 29, 9-19.

Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & van den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201-215.

Troi, A., & Lucchi, E. (a cura di). (2013). *Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, Italia, 16-18 settembre 2013*. Milano: Felix Verlag Editrice.

Troi, A., & Bastian, Z. (a cura di). (2014). *Energy efficiency solutions for historic buildings: A Handbook*. Basilea: Birkhäuser. Da <http://www.3encult.eu/en/newsevents/all/NewsDetails.html?entryid=110916>.

Vinci, C. (2003). *La sostenibilità in edilizia: Criteri e regole dell'arte per il costruire "sano"* (Tesi di Dottorato). Università degli Studi di Palermo, Italia.

Vinci, C. (2013). *La costruzione sana. Criteri di sostenibilità tra tradizione e innovazione*. Palermo: Fotograf Edizioni.

Wood, Chris, Bordass, Bill e Baker, Paul. (2009). *Research into the thermal performance of traditional windows: timber sash windows. Executive summary. October 2009*. English Heritage.

Yang, L., Yan, H., & Lam, J.C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. *Applied Energy*, 115, 164-173.

ISO 9869:1994. Thermal insulation - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

UNI 10351:2015. Materiali e prodotti per l'edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto.

UNI 10355:1994. Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.

UNI EN 1745:2012. Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche.

UNI EN 1934:2000. Prestazione termica degli edifici - Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro - Muratura.

UNI EN ISO 6946:2008. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.

UNI EN ISO 10211-1:1998. Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Metodi generali di calcolo.

UNI EN ISO 10456:2008. Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto.

UNI EN ISO 13786:2008. Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo.

UNI/TR 11552:2014. Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici.

UNI/TS 11300-1:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

CAPITOLO 4

Contributo alla caratterizzazione termofisica delle murature storiche palermitane

Contribution to the thermophysical characterisation of historic stone walls in Palermo

ABSTRACT - The shortage of thermal data for traditional materials and components generally results in an underestimation of the historic building energy performance. In the scientific literature this is notably evident for masonry. The heterogeneity related to the construction features and to the frequent, historical alterations complicates the estimation of thermal properties, among which thermal transmittance is particularly significant.

This chapter exposes a contribution to the thermophysical characterisation of historic stone walls in Palermo. The most used material in the town building tradition is a sedimentary rock, calcarenite. Its physical and mechanical properties varied greatly according to the quarry where it was extracted and this influences its thermal features.

The physical and mechanical properties of calcarenites and the construction techniques of masonry in Palermo have been studied in depth along the last decades. Their thermal characters have been a matter of some researches concerning the health in construction, which date back to the end of the XIX century. More recent but few data are available for calcarenites currently used in building activities. However their quarries are different from those used in historic constructions. Thermal data about sedimentary rocks and stones with similar properties, such as tuff, can be found for other geographic areas, both in Italy and abroad. Other values are reported in technical standards, notably UNI 10351:2015, UNI EN ISO 10456:2008, UNI EN 1745:2012. Nevertheless, their differences imply significant discrepancies between the calculated behaviour of the building and the real one.

The contribution here exposed consists of two parts. In the first, laboratory tests have been conducted at the Fraunhofer Institute for Building Physics IBP in Holzkirchen, Germany, on three calcarenite samples, taken from two XIX century buildings. The measurements regard their thermal conductivity and a wide hygrometric analysis for one specimen. The results, which differ according to the specimen physical properties, are in close agreement with the values reported in the standard UNI 10351:2015. Otherwise, they indicate that the thermal conductivity provided by UNI EN ISO 10456:2008 and UNI EN 1745:2012 are overestimated.

The second part consists of in situ measurements of thermal conductance, carried out in Palermo in the Saint Anne's convent, a monumental building which hosts a museum, in collaboration with the Italian research agency ENEA. The survey examines the variation of thermal transmittance according to the material and construction differences among the stone walls. In this sense the case study is relevant since its complex construction history has resulted in a rich variety of wall features. About these, information can be found in available archival studies and in the technical documents concerning the restoration works completed in 2006. Moreover, the thermal transmittance values derived from measurements are compared to calculations based on the standards UNI EN ISO 6946:2008 and UNI EN 1745:2012. In agreement with similar researches the exposed measurements, conducted in three periods between the winters 2013-2014 and 2014-2015, show that calculation tends to overestimate the thermal transmittance of calcarenite stone walls. However, the discrepancy with the measured results is slight or relevant according to the thermal conductivity chosen for calculation.

The contribution here exposed cannot result in representative values because this would require a wider survey on more numerous buildings. It is an effort to broaden the thermophysical knowledge about the envelope components of Palermo's architectural heritage. Finally, these measurements are preparatory to the purposes of the research, since a reliable assessment of the current energy performance is necessary to examine the possibilities for a compatible energy improvement of historic buildings.

Il recupero conservativo di un edificio storico non può prescindere dalla conoscenza dei caratteri materici e costruttivi della fabbrica. Anche per migliorarne le prestazioni energetiche e ambientali, dunque, è necessario ricorrere a indagini che consentano di comprendere l'effettivo comportamento termico e igrometrico della costruzione. Tuttavia la diagnosi energetica di un edificio storico pone non poche questioni: la rappresentatività dei risultati e la difficoltà d'esecuzione delle prove sono sensibilmente influenzate dalle caratteristiche dimensionali degli elementi tecnici, dalle disomogeneità che comunemente li connotano, dallo stato di degrado in cui spesso versano gli edifici da recuperare.

Se per le chiusure orizzontali e inclinate è relativamente semplice determinare la reale stratigrafia e quindi le prestazioni termiche, tale indagine appare più complessa per le chiusure verticali: il frequente impiego, in uno stesso edificio o anche nella stessa parete, di più materiali e apparecchi murari, insieme alla presenza di discontinuità spesso celate da rivestimenti a intonaco, richiederebbe un numero consistente di indagini per ottenere risultati rappresentativi. Le difficoltà a determinare l'effettiva composizione delle murature, insieme alla scarsa conoscenza delle caratteristiche termofisiche dei materiali che le costituiscono, si ripercuotono sulla valutazione delle prestazioni termiche e in particolare della trasmittanza.

I dati disponibili derivano in buona parte dallo studio dell'edificio recente o si riferiscono a un repertorio esiguo di soluzioni tecniche e costruttive. Sebbene l'UNI abbia recentemente ampliato la raccolta sulle caratteristiche termiche delle chiusure verticali attraverso la norma UNI/TR 11552:2014, tuttavia le informazioni riferibili anche al costruito storico restano poche. La ricchezza delle tradizioni costruttive locali suggerisce invece la realizzazione di abachi che, per contesti omogenei, riportino i principali parametri termici e igrometrici dei materiali e dei componenti propri dell'architettura storica. Queste raccolte non possono sofferire a un'indagine diretta sull'edificio, che, pur nei limiti dettati dalle difficoltà che l'accompagnano, resta fondamentale per la compatibilità dell'intervento; possono però costituire un valido supporto sia nella definizione di strategie di miglioramento energetico, sia nella progettazione preliminare del recupero.

In questa ricerca, per approfondire la conoscenza sulle caratteristiche termofisiche delle murature storiche palermitane, si è svolta una campagna di misure in opera di conduttanza termica presso il complesso monumentale di Sant'Anna alla Misericordia¹. Infatti per la sua articolata storia costruttiva il convento, oggi sede della Galleria d'Arte Moderna (GAM) della città, è caratterizzato da una ricca casistica di murature in conci di calcarenite; queste, realizzate tra il XV e il XIX secolo, si distinguono per apparecchio murario, per provenienza del materiale lapideo, dunque per caratteristiche fisiche e meccaniche. Peraltro le numerose e rilevanti opere di consolidamento che la fabbrica ha subito nel tempo stimolano a indagare la variabilità dei risultati di misura anche nell'ambito di una stessa parete. Inoltre la possibilità di consultare la documentazione progettuale e di cantiere relativa al restauro del complesso, svolto fra il 1996 e il 2006, ha fornito, in assenza di indagini distruttive, alcune necessarie informazioni sulla composizione delle murature.

Le misurazioni svolte a Palermo mirano a raccogliere dati reali sulle prestazioni termiche delle murature storiche locali e a verificare l'applicabilità di quelli ottenuti per calcolo o desumibili dalle tabelle contenute nelle norme tecniche.

La letteratura identifica una delle cause principali della scarsa corrispondenza fra i valori di calcolo della trasmittanza termica e quelli desunti dalle misure in opera nella scarsità di dati di conducibilità termica appropriati ai materiali delle murature storiche. Pertanto, i valori di conduttanza termica determinati per il complesso di Sant'Anna sono corredati dell'analisi termica e igrometrica di tre campioni di calcarenite conchiliare, provenienti da due edifici ottocenteschi cittadini: su uno si è condotta un'approfondita caratterizzazione igrometrica; per tutti si è determinata la conducibilità termica, poi confrontata con i valori che, per le rocce sedimentarie e quelle che vengono comunemente definite "tufi", possono desumersi dalle raccolte normative esistenti. Le misure svolte non sono sufficienti a definire valori rappresentativi per le opere murarie della tradizione costruttiva palermitana, scopo che richiederebbe un maggior numero di indagini e l'estensione dello studio a un congruo numero di edifici. I risultati esposti sono intesi, invece, come un contributo alla conoscenza delle prestazioni termofisiche delle murature storiche della città in relazione alle loro caratteristiche materiche e costruttive.

4.1 La questione della trasmittanza termica per le murature storiche

Le raccolte normative sulle caratteristiche termofisiche dei materiali e dei componenti edilizi, sebbene in misura limitata, contengono anche dati applicabili agli edifici storici e ai loro elementi d'involucro (cfr. cap. 3). Questi ultimi variano sensibilmente da un ambito locale all'altro perché diversi sono i materiali e le tecniche delle rispettive tradizioni costruttive; in special modo per le murature, si rintracciano casistiche molto ricche e variegata anche all'interno di contesti geograficamente ristretti. I dati raccolti nelle norme, tuttavia, si riferiscono a pochi materiali lapidei e a un numero ancor più limitato di apparecchi murari. Inoltre la procedura di calcolo della trasmittanza termica, descritta nella UNI EN ISO 6946:2008, si adatta bene a componenti uniformi e divisibili in strati omogenei, dunque piuttosto lontani dalle irregolarità tipiche della costruzione storica. Queste disuniformità si sommano agli effetti di altri fattori, in particolare il comportamento igrometrico delle murature e la presenza di vuoti, quest'ultima difficilmente quantificabile e legata sia alle tecniche costruttive adottate sia a fenomeni di degrado verificatisi nel tempo. Pertanto è ormai ampiamente condivisa l'opinione secondo la quale l'attendibilità dei risultati di calcolo debba essere verificata attraverso misure in opera di trasmittanza termica.

Utili riferimenti possono essere gli studi che, incentrati su singoli edifici storici, ne indagano le prestazioni attuali come presupposto per valutare l'efficacia di interventi proposti o realizzati; in essi si rintracciano frequentemente i risultati di misure di conduttanza o trasmittanza termica, eseguite talvolta su solai, coperture e serramenti, ma per la maggior parte sulle pareti d'involucro. Altre ricerche, invece, indagano proprio la rispondenza tra i valori di calcolo o tabellari della trasmittanza termica e le prestazioni effettive delle

murature storiche, concentrandosi su contesti regionali o nazionali. In genere esse evidenziano che i risultati di calcolo e ancor più i valori tabellari (come quelli della UNI/TR 11552:2014) sovrastimano la trasmittanza termica rispetto alle misurazioni in opera. Misto alla carenza di indagini termiche e igrometriche, ciò stimolerebbe interventi più estesi rispetto a quanto sarebbe sufficiente per il miglioramento energetico dell'architettura storica. Ne sono conferma recenti studi svolti in Italia e in altri Paesi europei.

Una campagna di misure in opera di trasmittanza termica è stata condotta sull'architettura tradizionale scozzese (2008 e 2011) e su quella inglese (2013a) da Baker. Nella prima sono state indagate murature i cui spessori variano da 30 a 120 cm. Alcune delle 57 misure svolte riguardano strutture in laterizi, in terra o ad intercapedine ma sono state analizzate soprattutto murature in pietra a sacco che, trovandosi in varie località della Scozia, si caratterizzano per un'ampia varietà di lapidei. Difatti lo stesso autore evidenzia come il numero delle determinazioni, sebbene notevole, non sia sufficiente a differenziare le prestazioni dei vari materiali, tenendo peraltro in conto che i valori di trasmittanza possono variare sensibilmente anche in uno stesso edificio. Da questo studio emergono comunque considerazioni interessanti, estensibili ad altri ambienti. In particolare, i risultati di misura sono confrontati con quelli calcolati secondo la EN ISO 6946:2007; prescindendo dalle finiture, per il calcolo le murature sono state descritte attraverso due strati omogenei, l'uno di malta e l'altro di pietra, secondo proporzioni che variano dall'assenza di malta a un contenuto pari al 40% dello spessore murario. Come evidenziato dall'autore, le discrepanze rispetto alle misure in opera discendono da numerosi fattori: innanzitutto dalla conoscenza dell'apparecchio murario e del contenuto di malta, in genere lacunosa per la frequente impossibilità a svolgere indagini distruttive; inoltre dalle difficoltà di modellare apparecchi murari come le murature caotiche e quelle a sacco. I risultati di Baker mostrano che gli scostamenti fra calcoli e misure si riducono sensibilmente se si tiene conto della presenza della malta², ma restano considerevoli per più di metà delle murature indagate e tendono a sovrastimarne la trasmittanza termica.

A conclusioni analoghe giungono Rye e Scott (2012), che, seguendo la stessa metodologia di Baker, hanno condotto 78 misure di trasmittanza termica sulle pareti d'involucro di numerosi edifici inglesi, quasi tutti realizzati con tecniche costruttive tradizionali. Lo studio tuttavia ha indagato una varietà più ampia di soluzioni costruttive, dalle strutture in pietra a quelle intelaiate in legno, e il numero contenuto delle determinazioni relative a ciascuna rende ardua una generalizzazione dei risultati.

Lo studio sull'architettura storica inglese (Baker, 2013a), invece, ha coinvolto esclusivamente murature in mattoni, di spessori compresi fra 230 e 300 mm e site in tre località, nelle quali erano impiegati laterizi di dimensioni e densità differenti. Sono state analizzate diciotto pareti e per ciascuna si sono condotte due misure. Anche in questo caso l'autore evidenzia come le principali incertezze di calcolo derivino dalla scelta della conducibilità termica, che per il mattone può variare sensibilmente con le sue caratteristiche fisiche. Pertanto lo studio è corredato della determinazione (Baker, 2013b) di questa proprietà in laboratorio³ per tre campioni laterizi, alcuni dei quali provenienti dagli edifici analizzati; la

misura è stata eseguita sui provini sia asciutti sia saturi d'acqua. L'impiego di questi valori di conducibilità nel calcolo della trasmittanza termica ha mostrato che quelli relativi ai campioni asciutti forniscono risultati sovrapponibili alle misure in opera di trasmittanza; soprattutto, evidenzia l'affidabilità dei modelli di calcolo e riconduce le incertezze principalmente alla carenza di dati termofisici adatti al costruito storico.

Procedure e conclusioni simili connotano uno studio svolto in Lombardia (Adhikari, Luchini e Pracchi, 2012; Bellotti e Sangalli, 2014), che ha indagato le murature di 22 edifici storici di epoca compresa fra il XII e il XIX secolo. Le 56 misure di trasmittanza condotte hanno riguardato strutture in pietra, in mattoni e miste, di spessori compresi fra 46 e 110 cm. Per la maggior parte delle pareti si sono svolte due o tre misure. Queste determinazioni sono state confrontate sia con i valori tabellari e d'abaco desumibili dalla UNI/TS 11300-1:2008, sia con i calcoli (UNI EN ISO 6946:2008) condotti adoperando i valori di conducibilità termica contenuti nelle norme UNI 10351:1994 e UNI EN 1745:2012. Si sono eseguite anche misure di conducibilità su mattoni laterizi risalenti alla fine del XIX secolo. Di nuovo la comparazione ha evidenziato la sovrastima dei valori di calcolo, e ancor di più di quelli tabellari, rispetto alle determinazioni in opera. La divergenza riguarda soprattutto gli spessori ridotti, in quanto, rilevano gli autori, l'aumentare della sezione muraria diviene preponderante sulle caratteristiche termiche del materiale. Lo studio suggerisce anche un ruolo significativo, nelle discrepanze fra calcolo e misure, della presenza di vuoti e del contenuto di umidità. Si rileva, per quest'ultimo aspetto, che alcuni strumenti informatici, simulando contestualmente il comportamento termico e igrometrico delle murature in condizioni dinamiche, calcolano l'influenza del contenuto di umidità sulla trasmittanza termica.

Da questi studi emerge l'importanza di approfondire le proprietà termiche dei materiali dell'edilizia storica nei diversi ambiti locali e il ruolo significativo che essi, insieme alle modalità costruttive, hanno nel determinare le prestazioni delle murature. Come sottolineano Bellotti e Sangalli (2014), la necessità di svolgere molteplici misure anche su più punti delle stesse pareti, così da individuare valori sufficientemente rappresentativi per le tipologie murarie indagate, suggerisce l'opportunità di restringere il campo d'indagine a poche variabili materiche e costruttive.

4.2 Dati termofisici per le murature storiche in calcarenite

Le murature storiche palermitane sono caratterizzate dall'impiego pressoché esclusivo delle calcareniti conchiliari, rocce sedimentarie molto diffuse nel territorio cittadino e in buona parte della Sicilia occidentale. Anche se con sporadiche ma rilevanti eccezioni, la grande disponibilità di una pietra facilmente lavorabile induceva a limitare l'utilizzo dei mattoni laterizi alla costruzione di strutture sottili e alle opere di consolidamento.

Già nella seconda metà del XIX secolo la grande varietà delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle calcareniti fu evidenziata con criteri scientifici da Giovanni Salemi Pace in due insiemi di esperienze pubblicate nel 1881 e nel 1890 (Fatta, 1993). Queste misure, condotte su campioni di calcarenite prelevati da molte delle cave più sfruttate, mostrano

come in ragione della provenienza della pietra e della profondità di estrazione variano grandemente la massa volumica e la resistenza a compressione: la prima da circa 1.400 a 1.860 kg·m⁻³, la seconda dai 17 ÷ 18 kg·cm⁻² registrati per alcune calcareniti bagheresi sino ai 98 kg·cm⁻² della pietra di Cinisi e ai 117 kg·cm⁻² di una delle rocce di Santa Flavia. Caso particolare era invece quello della pietra di Danisinni, che a una massa volumica di 2.232 kg·m⁻³ associava una resistenza a compressione di 228 kg·cm⁻².

La conoscenza empirica di queste differenze era sedimentata nella regola dell'arte locale. Lo evidenzia, accanto alle conseguenti differenze di costo, la selezione della pietra da adoperare nelle varie parti della costruzione edilizia in base alla cava di provenienza della pietra e alla profondità di estrazione (La Duca, 1964; Campisi e Mutolo, 2003). Caso esemplare dell'utilizzo ragionato delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle calcareniti nella costruzione architettonica è il Teatro Massimo di Palermo (Fatta, 1996).

Alaimo, Giarrusso e Montana (2008) notano che nel bacino estrattivo di Palermo possono distinguersi tre settori, dei quali uno corrispondente alla piana della città, uno orientale nella zona di Bagheria, uno occidentale nei pressi di Carini e Capaci⁴. Prima all'interno della stessa città murata, poi in aree esterne sempre più distanti, questi settori sono stati sfruttati nel corso dei secoli attraverso un gran numero di cave, a cielo aperto o in sotterraneo; un esteso elenco è riportato da La Duca (1964), che per la pietra di ogni

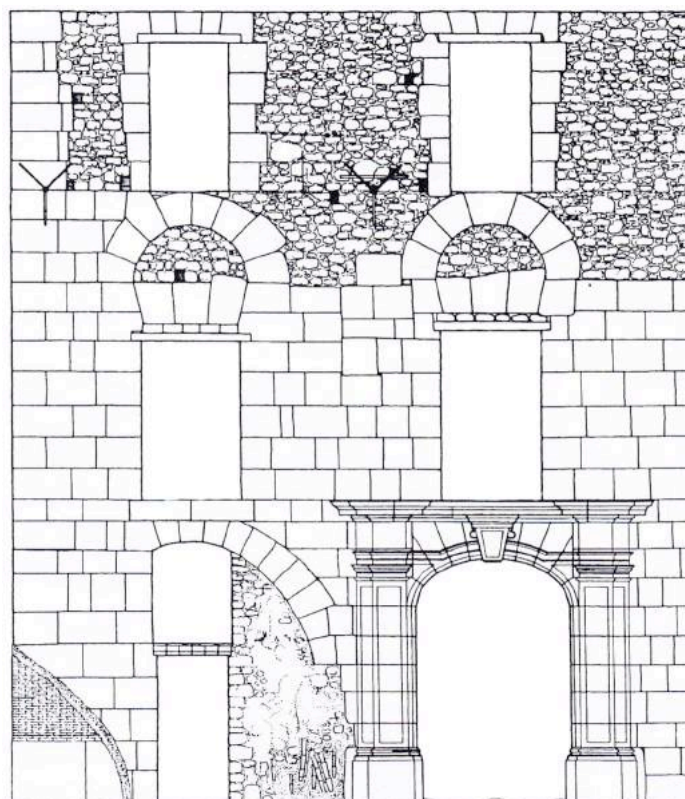


Figura 4.1. Organismo murario di palazzo Magnisi a Palermo. I molteplici apparecchi murari erano resi uniformi per mezzo del rivestimento a intonaco. Da Giovanetti (1997).

cava annota i dati medi di massa volumica e resistenza a compressione, mentre un'analisi approfondita per l'area bagherese è condotta da Fricano (1999).

Specialmente per gli edifici aulici, la ricerca documentaria consente talvolta di conoscere, almeno per alcune fasi della storia costruttiva della fabbrica, la provenienza della pietra impiegata. Questa però resta ignota nella maggior parte dei casi. Alaimo et al. (2008) hanno indagato come l'analisi di laboratorio delle calcareniti possa aiutare a identificarne, se non la cava di provenienza, almeno il settore estrattivo. Essi sottolineano che proprietà fisiche quali quelle porosimetriche, legate all'insieme delle caratteristiche tessiture e strutturali della pietra, possono variare sensibilmente non solo tra i bacini estrattivi, ma anche in uno stesso fronte di cava. Una distinzione più chiara fra le tre principali aree d'estrazione è correlabile invece ai caratteri geochimici delle calcareniti, cioè al tenore di materiali detritici o residuali rintracciabili, mentre l'associazione della pietra esaminata a un numero ristretto di cave può essere supportata dall'analisi delle caratteristiche mineralogiche e petrografiche.

Alla varietà delle proprietà fisiche e meccaniche delle calcareniti si aggiunge, come per altri contesti storici, un vasto panorama di apparecchi murari; si è accennato che, come evidenziano Campisi e Mutolo (2008), la scelta dell'apparecchio era dettata da ragioni statiche ma anche economiche. Soprattutto, è l'evoluzione complessa delle costruzioni, fatta di sopraelevazioni, divisioni, cambi di distribuzione, riparazioni, che determinano la forte variabilità delle caratteristiche delle murature. Anche in uno stesso edificio, e addirittura in una stessa parete, è possibile trovare brani di muratura differenti per epoca di costruzione, per apparecchio, per materiali. A ciò si aggiungono le frequenti tracce di consolidamenti e regolarizzazioni, quasi sempre nascoste dal rivestimento a intonaco cui le murature palermitane erano tradizionalmente destinate.

La varietà delle proprietà fisiche delle calcareniti ne influenza anche le caratteristiche

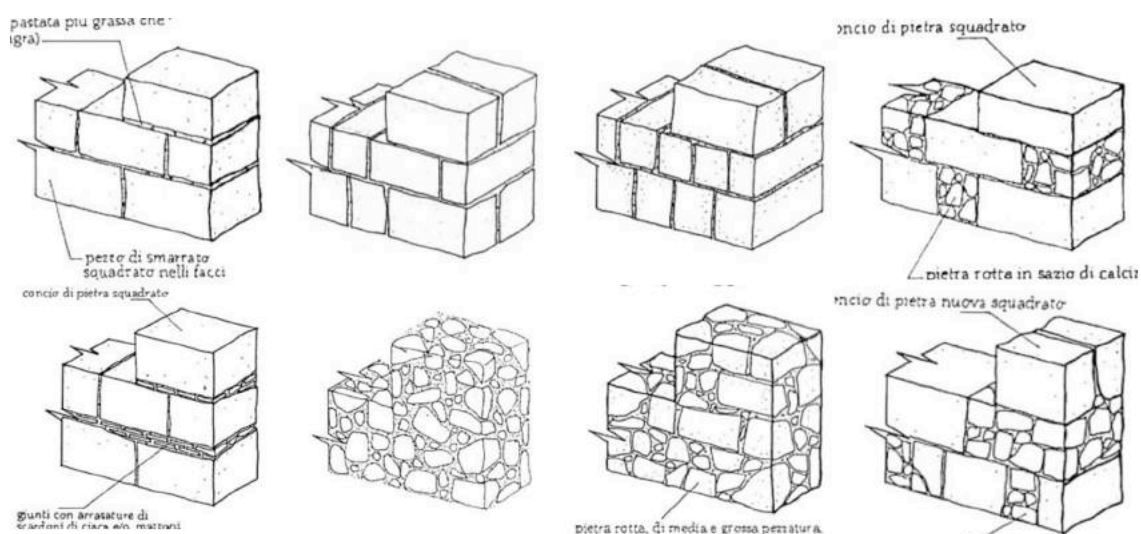


Figura 4.2. Casistica di alcuni fra gli apparecchi murari più diffusi a Palermo, fra i quali si annoverano anche le murature a sacco. Da Campisi e Mutolo (2003).

termiche. Già sul finire del XIX secolo, sulla scorta di analoghe ricerche svolte nelle principali città europee e a breve distanza dalle esperienze di Salemi Pace, furono condotti degli interessanti studi sulle caratteristiche fisiche e igieniche dei materiali da costruzione più diffusi in area palermitana (Vinci, 2003). Delle calcareniti venivano indagate la porosità, l'attitudine al trasporto dell'acqua, la permeabilità all'aria ma anche la trasmissione del calore: questa era ritenuta infatti necessaria per completare la caratterizzazione igienica di un materiale, in quanto si riconosceva al benessere termico un ruolo di rilievo nella salubrità degli ambienti interni. Su campioni provenienti da cave di tutti i principali settori d'estrazione De Blasi e Castiglia (1891) misurarono l'assorbimento d'acqua e la porosità: in base alla cava ma anche alla qualità del materiale ("smarrato", "normale", "d'intaglio"), la quantità d'acqua assorbita variava fra il 12,51 e il 27,19% in peso, la porosità fra il 36,66% per il "tufo" di Carini e il 47,56% per quello di Cinisi. Di alcune di queste rocce, provenienti principalmente da Aspra, furono successivamente indagate la permeabilità all'aria (De Blasi e La Manna, 1892) e la trasmissione del calore (De Blasi e Castiglia, 1893). Quest'ultima fu espressa in termini relativi rispetto a quella di un mattone laterizio di produzione locale, del quale tuttavia non sono note le caratteristiche fisiche e meccaniche; i risultati dello studio indicano che alcune delle calcareniti indagate conducono il calore più del laterizio, altre in misura minore o analoga, mentre la trasmissione sembrava aumentare se la pietra veniva rivestita d'intonaco.

Non sono stati rintracciati studi sistematici più recenti sulle caratteristiche termofisiche delle calcareniti palermitane. Sono disponibili, invece, i dati forniti da alcuni produttori per i materiali attualmente in commercio, che non comprendono le cave d'impiego storico, già quasi tutte in disuso nella prima metà del XX secolo; ad esempio, una scheda di prodotto per la pietra tratta dalla cava di Sabucina, presso Caltanissetta, riporta, come esito delle misure di laboratorio condotte su campioni la cui massa volumica apparente è pari a $1.846 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, una conducibilità termica di $2,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e un assorbimento capillare di $170 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-2}$.

Alcuni dati possono essere desunti dalle raccolte normative esistenti. Alcune riguardano le caratteristiche termofisiche dei materiali da costruzione, altre si riferiscono alle prestazioni delle murature. La norma UNI 10351:2015, in particolare, riporta i valori di conducibilità termica di vari materiali lapidei, già pubblicati nell'edizione del 1994. Fra questi, alcuni riguardano i "tufi", termine con il quale tradizionalmente sono indicate anche le rocce sedimentarie palermitane, per via della somiglianza con le proprietà fisiche e meccaniche di queste pietre vulcaniche. La norma indica per i "tufi" due valori di conducibilità termica⁵: $0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ se la massa volumica del materiale secco è pari a $1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $1,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ qualora sia di $2.300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; per il resto si può procedere per interpolazione lineare, data la proporzionalità fra massa volumica apparente e conducibilità termica equivalente (Stella e Madio, 1993). Valori differenti dalla UNI 10351 sono quelli della norma UNI EN ISO 10456:2008. In essa alle rocce sedimentarie (*natural, sedimentary rock*) di massa volumica pari a $2.600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ è associata una conducibilità termica di progetto di $2,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, mentre alle rocce sedimentarie leggere (*natural, sedimentary rock, light*), con $\rho=1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, è

attribuita una conducibilità di $0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Tali valori sono ribaditi nella norma UNI EN 1745:2012, che indica anch'essa $0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per il “calcare, pietra molto morbida” ($\rho \leq 1.590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e assegna una conducibilità di $1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ al “calcare, pietra morbida” (con massa volumica da $1.600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $1.790 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Anche per le malte i valori desumibili dalle varie raccolte non sono sempre concordi. La norma UNI 10351:2015 indica valori di conducibilità termica di $0,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per “intonaco di calce e gesso” ($\rho = 1.400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e $0,90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ($\rho = 1.800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) per “malta di calce o di calce e cemento”. La UNI EN ISO 10456:2008 attribuisce una conducibilità di $0,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ agli intonaci di calce e sabbia (*plasters and renders - lime, sand*) per i quali la massa volumica indicata è di $1.600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nella UNI EN 1745:2012, invece, per le malte da muratura e da intonaci non si fa distinzione in base al legante impiegato, ma la conducibilità è indicata solo in funzione della massa volumica del materiale e varia fra $0,074 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $1,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per malte da 200 a $2.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ⁶.

NORMA	TIPO D'INTONACO	MASSA VOLUMICA [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	CONDUCIBILITÀ TERMICA [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
UNI 10351:2015	Intonaco di calce e gesso	1.400	0,70
	Malta di calce o di calce e cemento	1.800	0,90
UNI EN ISO 10456:2008	<i>Plasters and renders - lime, sand</i>	1.600	0,80
UNI EN 1745:2012		1.400	0,45
		1.600	0,61
		1.800	0,82
UNI/TR 11552:2014	Intonaco interno	1.400	0,700
	Intonaco esterno	1.800	0,900

Tabella 4.1. Valori di conducibilità termica che le norme tecniche riportano per malte e intonaci.

Com'è stato rilevato per altri contesti geografici (Lucchi e Pracchi, 2013), analogamente ai laterizi le differenze che nelle raccolte normative sussistono per alcune pietre da costruzione influenzano il calcolo della trasmittanza termica. Comunque, la prossimità dei valori di conducibilità termica dei “tufi” e delle “rocce sedimentarie leggere” a quelli attribuibili alla malta induce a ritenere limitata l'incidenza che il contenuto di quest'ultima può avere sulla trasmittanza termica della parete. In una certa misura, quindi, sarebbe ridotta anche l'influenza dell'apparecchio murario, sebbene com'è noto il contenuto di malta ne costituisca solo un aspetto.

Sui valori di trasmittanza termica delle murature non viene in soccorso la norma UNI 10355:1994 la quale, basandosi sui dati della UNI 10351, fornisce valori di resistenza termica per murature e solai. La raccolta si concentra sulle tecnologie costruttive attuali e all'ambito storico possono adattarsi soltanto i valori forniti per le murature in laterizi, riferiti a spessori sino a 425 mm e comunque poco applicabili al caso palermitano. Un abaco dei componenti opachi d'involucro degli edifici esistenti è invece oggetto della norma

UNI/TR 11552:2014. Integrazione di quello prima contenuto nella UNI/TS 11300-1:2008, tale abaco fornisce i principali parametri termofisici, fra i quali la trasmittanza termica, anche per numerose tipologie murarie. Queste comprendono anche strutture in laterizio pieno, in materiale composito e in pietra. Fra queste ultime rientrano le pareti in pietra a blocchi (MPI02) e quelle in blocchi squadrate di tufo (MPI03); i valori forniti riguardano spessori al finito di 44 ÷ 104 cm per la prima tipologia e 34 ÷ 74 per la seconda. Per le pareti in pietra, tuttavia, ai blocchi sono associate una massa volumica di 2.500 kg·m⁻³ e una conducibilità termica di 2,400 W·m⁻¹K⁻¹; queste sono rispettivamente 1.600 kg·m⁻³ e 0,550 W·m⁻¹K⁻¹ per i blocchi di tufo. In entrambi i casi, l'intonaco interno e quello esterno sono spessi 2 cm; il primo ha massa volumica di 1.400 kg·m⁻³ e conducibilità pari a 0,700 W·m⁻¹K⁻¹, il secondo 1.800 kg·m⁻³ e 0,900 W·m⁻¹K⁻¹, analogamente all'“intonaco di calce e gesso” e alla “malta di calce o di calce e cemento” della norma UNI 10351:2015 (cfr. par. 3.2.1).

	TRASMITTANZA TERMICA							
	[W·m ⁻² K ⁻¹]							
Spessore degli strati [cm]	2-30-2	2-40-2	2-50-2	2-60-2	2-70-2	2-80-2	2-90-2	2-100-2
Pareti in pietra	-	2,58	2,33	2,12	1,95	1,80	1,68	1,57
Muratura in blocchi squadrate di tufo	1,30	1,05	0,88	0,76	0,67	-	-	-

Tabella 4.2. Valori di trasmittanza termica indicati nell'abaco di murature della norma UNI/TR 11552:2014 per le pareti “in pietra” e “in blocchi squadrate di tufo” al variare dello spessore murario (cfr. tab. 3.6).

Per i casi in cui non siano disponibili informazioni sugli strati componenti la parete, la stessa norma riporta anche i valori tabellari (“prospetto 2”) prima contenuti nel prospetto A.1 della UNI/TS 11300-1:2008. Per le murature palermitane sono impiegabili i dati relativi alla “muratura di pietrame intonacata” (per spessori da 30 a 60 cm) e, sebbene appaia forzato, quelli della “muratura di mattoni semipieni o tufo” (per spessori da 15 a 60 cm).

	TRASMITTANZA TERMICA									
	[W·m ⁻² K ⁻¹]									
Spessore [cm]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Muratura di pietrame intonacata	-	-	-	2,99	2,76	2,57	2,40	2,25	2,11	2,00
Muratura di mattoni semipieni o tufo	2,19	1,96	1,76	1,57	1,41	1,26	1,14	1,04	0,96	0,90

Tabella 4.3. Trasmittanza termica per alcune tipologie di muratura, che la norma UNI/TR 11552:2014 riporta per i componenti opachi di edifici esistenti, suggerendone l'impiego qualora non sia possibile un calcolo rigoroso fondato su ispezioni o fonti più attendibili.

La scarsità dei dati disponibili sulle calcareniti induce a cercare ulteriori riferimenti in studi condotti su murature o materiali lapidei simili, impiegati in altri contesti geografici. In quest'ottica appare interessante una raccolta di dati sull'architettura francese costruita prima del 1948 (Moye, 1980) (cfr. par. 3.2.1). In questo studio sono riportati valori di trasmittanza (*coefficient K*) per vari materiali lapidei (*granites, gneiss, porphyres; pierres*

calcaires; grès; meulières; schistes; pierres volcaniques), distinguendo murature costituite da un solo materiale e altre caratterizzate da un generico riempimento; per la prima tipologia muraria gli spessori al finito variano fra 20 e 80 cm, per le murature a sacco fra 50 e 80 cm. In particolare la norma riporta dei valori per le pietre calcaree “tenere” ($1.470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \leq \rho \leq 1.840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e “molto tenere” ($\rho < 1.470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), che più potrebbero avvicinarsi alle caratteristiche delle calcareniti palermitane.

TRASMITTANZA TERMICA DI PIETRE CALCAREE														
[W·m ⁻² K ⁻¹]														
Muratura	Materiale lapideo	Spessore murario al finito [cm]												
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Muri costituiti da un solo materiale	Pietre calcaree tenere	2,5	2,2	2,0	1,8	1,65	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15	1,1	1,05	1,0
	Pietre calcaree molto tenere	2,3	2,0	1,8	1,65	1,5	1,35	1,25	1,2	1,1	1,05	0,95	0,9	0,85
Muri a sacco	Pietre calcaree tenere							1,45	1,35	1,3	1,2	1,15	1,1	1,05
	Pietre calcaree molto tenere							1,3	1,25	1,15	1,1	1,05	1,0	0,95

Tabella 4.4. Valori di trasmittanza termica raccolti dall'Istituto francese CSTB (Moye, 1980).

Più recentemente, sempre in Francia, è stato condotto uno studio (*Projet Tuffeau*) per la riqualificazione termica di edifici in pietra calcarea, che si avvale di misure in opera e in laboratorio. La ricerca si concentra sulle pietre sedimentarie porose, indicate comunemente come *tuffeau*, ma fra loro piuttosto diverse per tessitura e caratteristiche fisiche. Le rocce indagate hanno una porosità media compresa fra il 35% e il 45% e una massa volumica di circa $1.400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ad esse viene attribuita una conducibilità media di $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Nell'ambito del progetto è stato eseguito un insieme di misure di conducibilità termica a differenti contenuti di acqua su un concio di pietra, per mezzo di un conduttimetro. I risultati, dei quali gli autori sottolineano comunque l'incertezza, indicano una conducibilità di $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ per il concio rispettivamente secco e saturo d'acqua (Stephan e Caucheteux, 2014).

Più adatti al caso palermitano appaiono invece gli studi condotti da diversi anni sulle calcareniti pugliesi. Mongelli, Scirucchio e Walsh (1993) hanno esaminato i parametri termici di quattro campioni lapidei che, differenti per tessitura (grana fine o grossolana), hanno simile porosità e massa volumica di circa $1.500 \div 1.550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Di questi provini sono stati misurati, al variare del contenuto d'acqua, la conducibilità e la diffusività termica, ricavando, in funzione di questi e della massa volumica, il calore specifico. Per ciascun campione si sono poi dedotte tre rette di regressione che, in funzione della massa volumica del campione secco e del contenuto d'acqua, esprimono rispettivamente la conducibilità termica, la diffusività termica e il calore specifico. Allo stato secco, in particolare, la conducibilità dei quattro campioni risulta compresa fra $0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $0,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Lo studio evidenzia anche che, nei provini a grana fine, al crescere del contenuto d'acqua la conducibilità termica aumenta meno che in quelli a grana grossolana, in quanto nei secondi ha un effetto più rilevante la sostituzione

dell'aria con l'acqua, cui è legato l'aumento del parametro analizzato.

Nello studio di Baggio et al. (1993), la conducibilità termica è ricavata da misure di massa volumica, calore specifico e diffusività, mentre Stella e Madio (1993) hanno mirato alla caratterizzazione termica delle calcareniti pugliesi e delle soluzioni costruttive tradizionali che le impiegano. Per la calcarenite indagata, di massa volumica pari a $1.510 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, riportano una conducibilità di $0,61 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$. Lo studio condotto da Bondi, Cardinale, Di Tommaso e Nino (1993), infine, ha confrontato le prestazioni termiche di due pareti in calcareniti pugliesi con altre in pietra calcarea e con tamponamenti moderni attraverso misure in opera di conduttanza termica. Le misure sono state eseguite con procedura analoga a quella della successiva norma ISO 9869:1994 e sono state condotte ciascuna per almeno cinque giorni. Per le due murature esaminate (55 cm e 43 cm), realizzate con struttura a sacco impiegando calcareniti di massa volumica stimata fra 1.300 e $1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, la conducibilità termica è risultata rispettivamente pari a $1,02$ e $1,50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, in buon accordo con i valori teorici di calcolo.

Anche dagli studi sulle calcareniti pugliesi risulta evidente come la natura stessa della roccia, il suo grado di cementazione e la sua tessitura ne influenzino le caratteristiche termiche e incidano di conseguenza sulle prestazioni delle murature. Gli studi e le ricerche esaminati confermano pertanto, accanto alla necessità di una diagnosi energetica della singola costruzione storica, l'importanza di indagare la variazione delle prestazioni termiche delle murature in ragione delle loro caratteristiche costruttive e materiche.

4.3 Caratteristiche termofisiche di tre campioni di calcarenite conchiliare

Nell'ambito della ricerca qui esposta, si sono svolte misure termiche e igrometriche su tre campioni di calcarenite, provenienti da due edifici storici palermitani. Un provino deriva dall'apertura in breccia di un vano di porta interno al piano terra di un palazzetto in via Carella, costruito nella seconda metà del XIX secolo durante l'espansione cittadina a nord delle mura. Due campioni provengono da un magazzino agricolo della villa Bonvicino nella Conca d'Oro; la costruzione, non più esistente, datava anch'essa alla seconda metà dell'Ottocento. Per nessuno dei due edifici, tuttavia, è stato possibile consultare documenti d'archivio che attestino l'epoca di costruzione o la provenienza dei materiali impiegati.

Le due calcareniti appaiono sensibilmente differenti a un'analisi macroscopica della sezione trasversale; lo evidenzia soprattutto la presenza di grandi conchiglie fossili nel campione di via Carella (indicato con la lettera C), che determina vuoti macroscopici e si contrappone alla tessitura più omogenea dei due campioni di villa Bonvicino (detti di seguito A e B). Dei tre provini si sono determinate la massa volumica apparente e reale, la porosità e la conducibilità termica; il campione A è stato anche oggetto di caratterizzazione igrometrica. Inoltre la conducibilità termica è stata determinata su un provino di pietra di Billiemi, calcare compatto molto utilizzato nella tradizione palermitana anche per i rivestimenti basamentali delle murature. Le prove sono state condotte presso i laboratori del *Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Standort Holzkirchen)* a Monaco di Baviera.

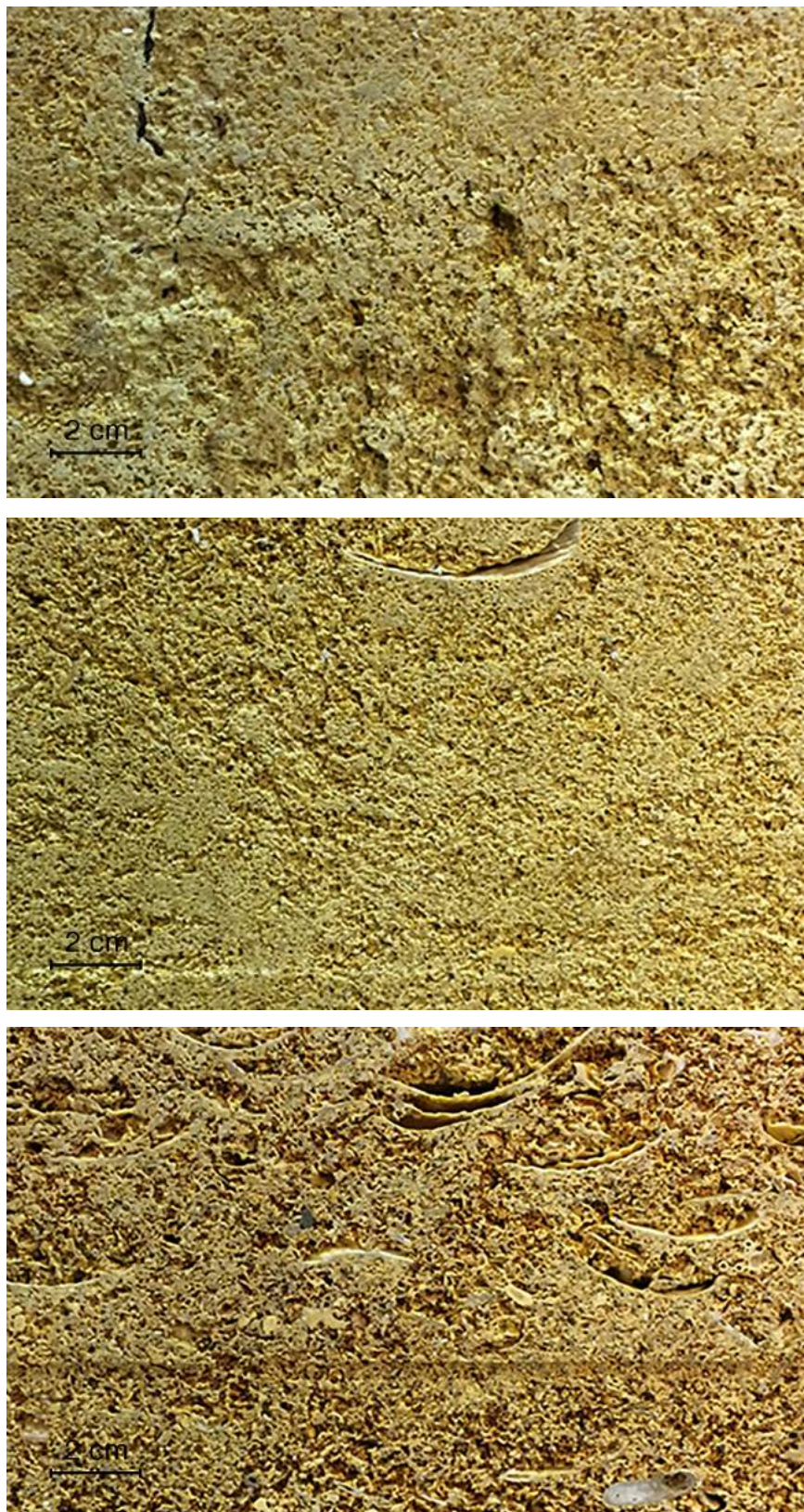


Figure 4.3, 4.4, 4.5. Sezioni di taglio dei conchi di calcarenite indicati con le lettere A (*in alto*), B (*al centro*), C (*in basso*).

4.3.1 Massa volumica e porosità

Ciascuno dei conci analizzati è stato tagliato con sega ad acqua in modo da ricavarne quattro campioni parallelepipedi, di dimensioni 20 x 20 x 5 cm. Due campioni per ogni concio, dopo essere stati asciugati in stufa a 105°C, sono stati misurati e pesati, così da ricavare la massa volumica apparente dal rapporto fra peso e volume; per ogni concio si è poi assunto come valore la media aritmetica delle due determinazioni. La porosità è invece il risultato del rapporto fra la massa volumica apparente e quella reale⁷. Quest'ultima è stata misurata, seguendo la norma DIN EN 1936, su un campione di circa 5 cm³ costituito da piccoli pezzi, ottenuti per parziale distruzione di una delle due parti impiegate per determinare la massa volumica apparente di ciascun concio. Per la prova è stato adoperato un picnometro a elio "AccuPyc II 1340 V1.05" della Micrometrics⁸.



Figure 4.6, 4.7, 4.8. Parti dei conci A, B e C (*in alto, da sinistra a destra*) da cui sono stati prelevati i campioni (*in basso a sinistra*) adoperati per la misura della massa volumica reale con picnometro a elio (*in basso a destra*).

Da queste determinazioni risulta che la calcarenite del concio A (che è oggetto anche delle misure igrometriche) è quella di maggior massa volumica apparente, 1.627 kg·m⁻³, e minor porosità, 40,3%. Il valore più basso della prima caratteristica, 1.479 kg·m⁻³, è

quello del concio B, anch'esso proveniente dalla villa Bonvicino, per il quale la porosità è pari al 45,3%. Per la pietra C, infine, i risultati sono rispettivamente $1.558 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e 42,6%.

	MASSA VOLUMICA APPARENTE				MASSA VOLUMICA REALE		POROSITÀ
	Spessore dei campioni		Risultato		Peso dei campioni	Risultato	Risultato
	Singolo	Media	Singolo	Media	[g]	[g·cm ⁻³]	[%]
	[mm]	[mm]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]			
A	A1	49	49	1.648	6,5270	2,7246	40,276
	A2	49		1.607			
B	B1	50	50	1.490	6,4040	2,7057	45,336
	B2	50		1.468			
C	C1	50	50	1.592	7,0700	2,7129	42,601
	C2	50		1.523			

Tabella 4.5. Valori di massa volumica e porosità per i tre campioni di calcarenite indagati.

4.3.2 Conducibilità termica

Per ogni concio la conducibilità termica è stata misurata, fra i due campioni analizzati per determinare la massa volumica, su quello non distrutto per la misura con il picnometro a elio. Prima della prova, ciascun campione è stato essiccato in stufa a 105°C.

La conducibilità è stata determinata secondo la norma DIN EN 12664⁹. In base a tale metodo, il provino è collegato a sei sensori di temperatura superficiale, dei quali tre sulla faccia superiore del campione e tre su quella inferiore. Le sonde sono disposte secondo una precisa geometria sulla parte centrale della superficie del campione e fissate con nastro adesivo eliografico, mentre il contatto continuo e uniforme con il materiale lapideo è garantito dall'utilizzo di una pasta termica. Il provino è poi disposto fra due piastre a temperatura differente, delle quali la superiore a 20°C e l'inferiore a 10°C, isolate dall'esterno in direzione normale al flusso di calore. Il sistema è chiuso, infine, all'interno di una scatola lignea. Il flusso di calore che attraversa il campione per effetto della differenza di temperatura è misurato per un periodo sufficiente alla sua stabilizzazione, che per i campioni analizzati è compreso fra le ventuno e le ventitré ore. Conoscendo l'area della superficie attraversata dal flusso (dunque anche la densità del flusso di calore) e la differenza di temperatura, si può determinare la resistenza termica del campione e quindi, in base allo spessore di questo, la conducibilità del materiale.

	DIMENSIONI	PESO	MASSA VOLUMICA APPARENTE	CONDUCIBILITÀ TERMICA
	[mm]	[kg]	[kg m ⁻³]	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
A1	200 x 200 x 49	3,230	1.648	0,7951
B1	199 x 200 x 50	2,965	1.490	0,6731
C1	200 x 200 x 50	3,183	1.592	0,7537

Tabella 4.6. Risultati delle misure di conducibilità termica determinati secondo la DIN EN 12664.



Figure 4.9, 4.10, 4.11, 4.12. Procedimento di misura della conducibilità termica.

I valori di conducibilità termica determinati sui tre campioni di calcarenite aumentano con la massa volumica apparente e si mostrano in buon accordo con quelli desumibili dalla norma UNI 10351:2015. Questi sono stati ottenuti per interpolazione lineare fra le conducibilità termiche di 0,63 e 1,70 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, assegnate rispettivamente a "tufi" di massa volumica secca pari a 1.500 e 2.300 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La conducibilità così ottenuta è risultata analoga a quella misurata per il campione della roccia C, sovrastimata del 4,2 % per quello della A e sottostimato dell'8,3 % per il provino della calcarenite B.

Il confronto è stato eseguito anche con i valori della UNI EN 1745:2012. Poiché questi sono assegnati per intervalli di massa volumica non si è proceduto per interpolazione lineare: ai campioni di massa volumica apparente non superiore a $1.590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ovvero B e C, si è attribuita la conducibilità $0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ del materiale secco; al campione A1, invece, $1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, che la norma associa ai calcari “morbidi” (da 1.600 a $1.790 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Questi valori, tuttavia, sono sensibilmente più alti rispetto a quelli di misura.

CAMPIONE	MISURE		UNI 10351:2015		UNI EN 1745:2012	
	ρ [kg m^{-3}]	λ_{mis} [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	λ_{10351} [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\frac{\lambda_{1745} - \lambda_{10351}}{\lambda_{10351}}$ [%]	λ_{1745} [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\frac{\lambda_{1745} - \lambda_{10351}}{\lambda_{10351}}$ [%]
A1	1.648	0,795	0,828	+ 4,2 %	1,1	+ 38,4 %
B1	1.490	0,673	0,617	- 8,3 %	0,85	+ 26,3 %
C1	1.592	0,754	0,753	- 0,1 %	0,85	+ 12,7 %

Tabella 4.7. Confronto fra i valori tabellari e di misura della conducibilità termica per i campioni di calcarenite indagati.

La conducibilità termica è stata misurata, seguendo la stessa procedura, su un campione di pietra di Billiemi proveniente dalla villa Bonvicino. Il provino, delle dimensioni di $195 \times 195 \times 53 \text{ mm}$ e del peso di $5,329 \text{ kg}$, ha una massa volumica di $2.763 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La conducibilità termica è risultata pari a $2,376 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Guardando alla norma UNI 10351:2015, il valore dovrebbe essere compreso fra $2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ indicato per massa volumica di $2.700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $3,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ per quella di $2.800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Per pietre calcaree molto dure, di massa volumica a secco fra 2.200 e $2.590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, la UNI EN 1745 indica invece $2,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (analogo valore riporta la UNI EN ISO 10456:2008 per rocce calcaree molto dure di $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).



Figura 4.13. Misura della conducibilità termica di un campione di calcare compatto di Billiemi. Si notano i tre punti della faccia inferiore del provino sui quali collocare i sensori e sui quali è già apposta la pasta termica.

4.3.3 Caratteristiche igrometriche

La caratterizzazione igrometrica della calcarenite indicata con la lettera A comprende misure di trasmissione del vapore acqueo, di assorbimento d'acqua, di assorbimento igroscopico e la determinazione della curva di asciugamento (tab. 4.8).

GRANDEZZA MISURATA		CAMPIONI
Coefficiente di diffusione del vapore	a recipiente secco (<i>dry-cup method</i>) a recipiente umido (<i>wet-cup method</i>)	A3, A4
Coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità		A5, A6
Assorbimento igroscopico	50 % 65 % 80 % 93 % 97 %	A7, A8, A9 A10, A11, A12 A13, A14, A15 A16, A17, A18 A19, A20, A21
Contenuto d'acqua di saturazione Curva di asciugamento		A22, A23

Tabella 4.8. Prove svolte per la caratterizzazione igrometrica della calcarenite indicata con la lettera A.

Il coefficiente di diffusione del vapore acqueo (o fattore di resistenza al passaggio del vapore) è stato determinato secondo la norma DIN EN ISO 12572¹⁰. Questa prevede che il campione del materiale indagato sia posto a chiusura di un recipiente in cui si trova una soluzione acquosa satura o un essiccante; sigillato al bordo del contenitore, il campione è posto in un ambiente a temperatura e umidità relativa controllate. A causa della differente pressione parziale di vapore fra questo e il recipiente di prova, si verifica un trasporto di vapore acqueo attraverso il provino. Ciò determina una variazione di peso del sistema formato dal contenitore e dal campione, variazione che nell'unità di tempo diviene costante quando la portata di vapore raggiunge condizioni stazionarie. La prova è stata condotta a recipiente secco (23°C, U.R. 0-50%) e a recipiente umido (23°C, U.R. 50-93%)¹¹.

Per il campione A di calcarenite il coefficiente di diffusione del vapore è stato determinato adoperando due provini di dimensioni 20 x 10 x 5 cm, ottenuti dal taglio delle due parti analizzate per la massa volumica del materiale. Su ciascuno la prova è stata condotta con entrambi gli ambienti di prova previsti dalla norma. Il singolo provino è stato posto su un recipiente di vetro avente la stessa area d'impronta. Nel metodo a recipiente umido (*wet-cup*), al suo interno è contenuta, sino a due centimetri dall'orlo, una soluzione salina a base acquosa (idrogenofosfato di ammonio), grazie alla quale l'aria compresa fra la soluzione stessa e la superficie inferiore del campione mantiene un'umidità relativa del 93%. Il provino è stato rivestito lateralmente di paraffina, risvoltata per alcuni millimetri anche sulla faccia superiore per assicurare che il vapore possa fluire soltanto attraverso il materiale lapideo senza vie preferenziali all'interfaccia con il sigillante. Collegati poi il provino e il recipiente con nastro adesivo di carta, anche questo è stato rivestito di paraffina. Una volta pesato, il

sistema è stato posto in camera climatica (T 23°C, U.R. 50%) e nuovamente pesato sino allo stabilizzarsi delle misure ponderali. Il procedimento è analogo al metodo con recipiente secco (*dry-cup*), nel quale all'interno del recipiente è contenuto gel di silice affinché l'aria a contatto con la faccia interna del provino sia secca (U.R. 0%). Le medie aritmetiche dei risultati ottenuti per i due provini sono $\mu=9,54$ con il metodo a recipiente secco (T 23°C, U.R. 0/50%) e $\mu=9,88$ con quello a recipiente umido (T 23°C, U.R. 50/93%).

COEFFICIENTE DI RESISTENZA ALLA DIFFUSIONE DEL VAPORE μ				
	Prove a recipiente secco (T 23°C, 0-50%)		Prove a recipiente umido (T 23°C, 50-93%)	
	[-]	[-]	[-]	[-]
A3	9,41	9,54	9,78	9,88
A4	9,66		9,97	

Tabella 4.9. Risultati delle misure del coefficiente di diffusione del vapore.

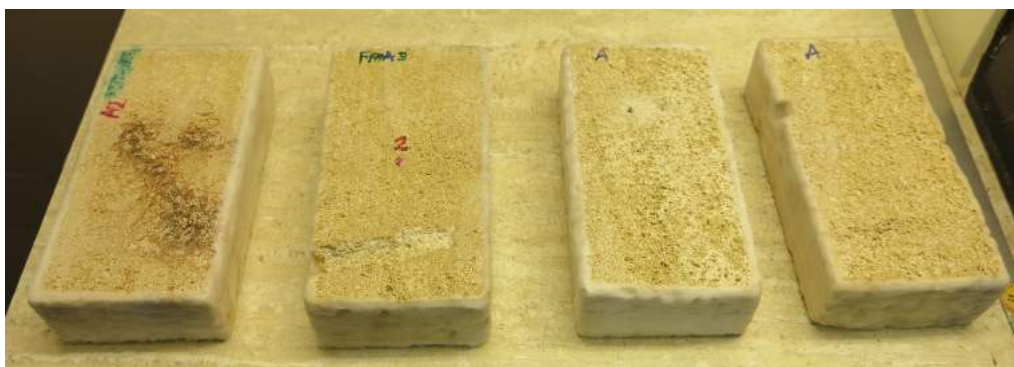


Figura 4.14. Campioni impiegati per misurare i coefficienti di diffusione del vapore e di assorbimento d'acqua.



Figura 4.15. Provini preparati secondo il metodo a recipiente umido (*wet-cup*) per la misura del coefficiente di diffusione del vapore.

Il coefficiente di assorbimento d'acqua per azione capillare è stato determinato secondo la norma DIN EN ISO 15148¹², che indica un metodo di valutazione nel breve periodo mediante immersione parziale senza gradiente di temperatura. Anche in questo caso sono stati adoperati due provini (A5 e A6), di dimensioni 20 x 10 x 5 cm, le cui superfici laterali sono state rivestite di paraffina, avendo cura che questa risvoltasse leggermente (circa 5 mm) sul bordo della faccia da immergere. I campioni così preparati sono stati pesati in condizioni asciutte e quindi posti in una vasca d'acqua, nella quale soltanto la parte inferiore del materiale lapideo è immersa nel liquido¹³. Secondo una cadenza temporale prestabilita¹⁴, ciascun provino è stato pesato dopo averlo poggiato su un panno umido per rimuovere l'acqua in eccesso.



Figura 4.16. Misura del coefficiente di assorbimento d'acqua per azione capillare.

Il coefficiente di assorbimento d'acqua per azione capillare si ottiene dalla variazione ponderale del campione nel tempo. Per i provini esaminati, il valore relativo a un tempo di assorbimento capillare di cinque minuti è risultato pari a $39,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$ per il campione A5 e $42,91 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$ per l'A6. La loro media aritmetica è $41,41 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$. Per il primo provino, inoltre, l'acqua è emersa sulla superficie esposta all'aria dopo la misura ponderale eseguita a cinque minuti dall'inizio; per il secondo, invece, ciò si è verificato successivamente alla misura dei quindici minuti.

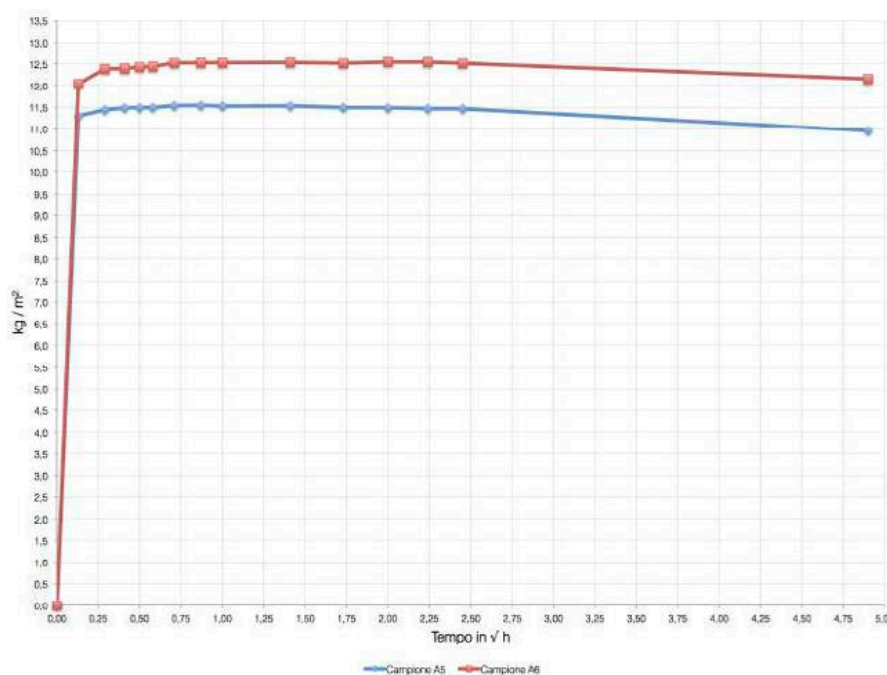


Figura 4.17. Variazione di peso del campione (divisa per l'area della sua superficie di base) rispetto allo stato iniziale asciutto, in funzione del tempo.

L'assorbimento igroscopico è stato esaminato secondo il metodo della camera climatica descritto dalla norma DIN EN ISO 12571¹⁵. Campioni del materiale da analizzare sono posti in camere climatiche a differenti condizioni di umidità relativa; se ne misura quindi lo scambio di vapore acqueo con l'aria circostante sino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio igroscopico, che richiedono tanto più tempo quanto maggiori sono le dimensioni dei provini.

Per l'analisi della calcarenite i campioni sono stati ricavati dalla frantumazione in piccoli pezzi dell'elemento A2 (impiegato per la misura della densità reale), essiccato prima in stufa a 105°C. Si sono preparati quindici provini, ciascuno dei quali formato da circa 10 g di materiale lapideo. Posti in contenitori di vetro aperti, i campioni sono stati distribuiti, a gruppi di tre, in cinque camere climatiche caratterizzate dalla stessa temperatura, 23°C, ma da differenti valori di umidità relativa: 50%, 65%, 80%, 93%, 97%. I provini sono stati pesati con cadenza settimanale per determinare l'assorbimento igroscopico dall'aria circostante, espresso come contenuto d'acqua in percentuale di peso o di volume. La prova si è conclusa quando l'attestarsi delle misure su valori costanti ha indicato il raggiungimento delle condizioni di equilibrio igroscopico, ovvero dopo ventiquattro giorni per i campioni esposti a un'umidità relativa del 50%, dopo ventisette per quelli al 65%, dopo diciannove per i restanti.

I risultati riguardanti le differenti condizioni di umidità relativa di prova sono stati calcolati come media aritmetica di quelli corrispondenti ai singoli campioni. Essi mostrano una variazione del contenuto di vapore in percentuale di volume da 0,84 % quando l'umidità relativa è del 50% al 2,11% quando essa raggiunge il 97%.

CAMERA CLIMATICA	CAMPIONE	CONTENUTO DI VAPORE	
		Valore singolo [vol. %]	Valore medio [vol. %]
T 23°C U.R. 50%	A7	0,83	0,84
	A8	0,95	
	A9	0,74	
T 23°C U.R. 65%	A10	0,95	0,84
	A11	0,81	
	A12	0,75	
T 23°C U.R. 80%	A13	0,95	1,11
	A14	1,37	
	A15	1,00	
T 23°C U.R. 93%	A16	0,99	1,13
	A17	1,22	
	A18	1,19	
T 23°C U.R. 97%	A19	2,14	2,11
	A20	1,35	
	A21	2,84	

Tabella 4.10. Risultati delle prove di assorbimento igroscopico.



Figure 4.18, 4.19, 4.20, 4.21. *In alto*: Parte A2 del concio di calcarenite (*a sinistra*), dalla quale sono stati ricavati i campioni per la misura dell'assorbimento igroscopico (*a destra*). *In basso*: provini esposti a un'umidità relativa del 50% (*a sinistra*) e del 97% (*a destra*).

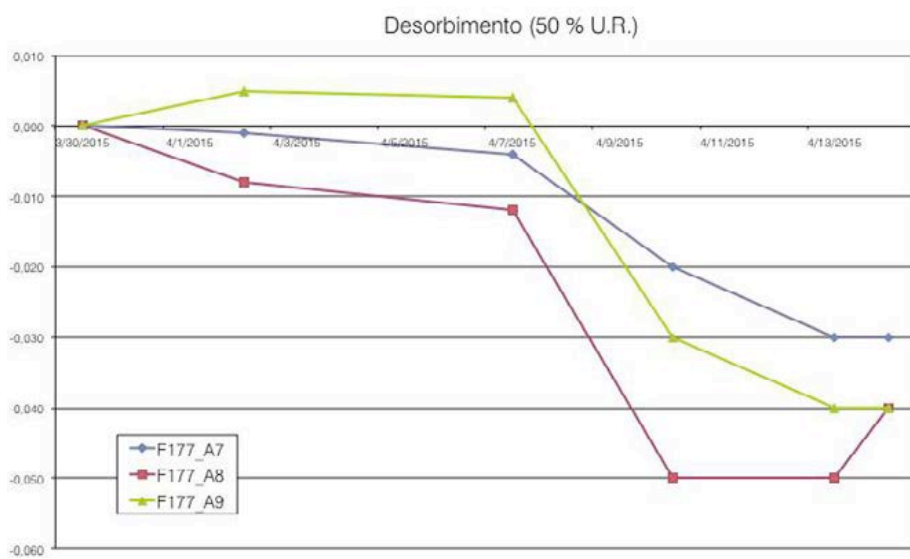
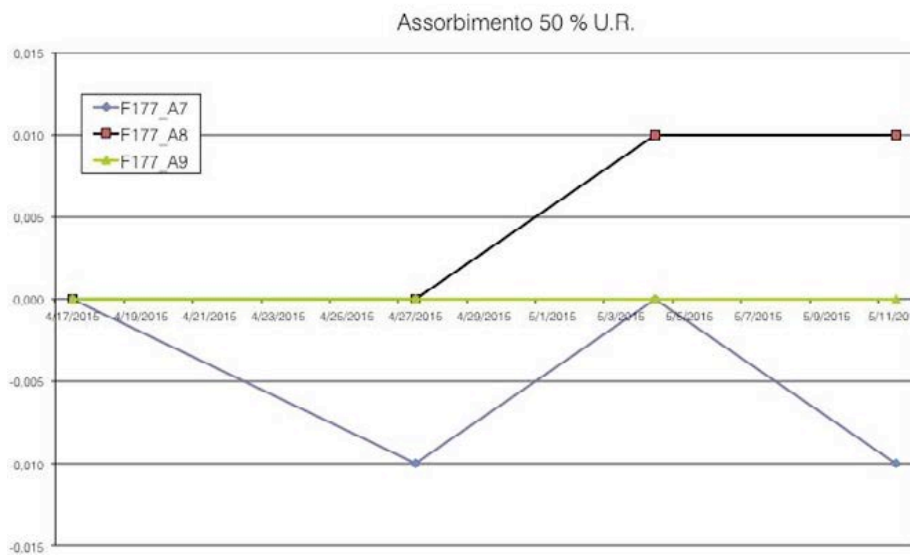


Figure 4.22, 4.23. Grafici di assorbimento e desorbimento igroscopico per i campioni di calcarenite esposti a un'umidità relativa del 50% (23°C).

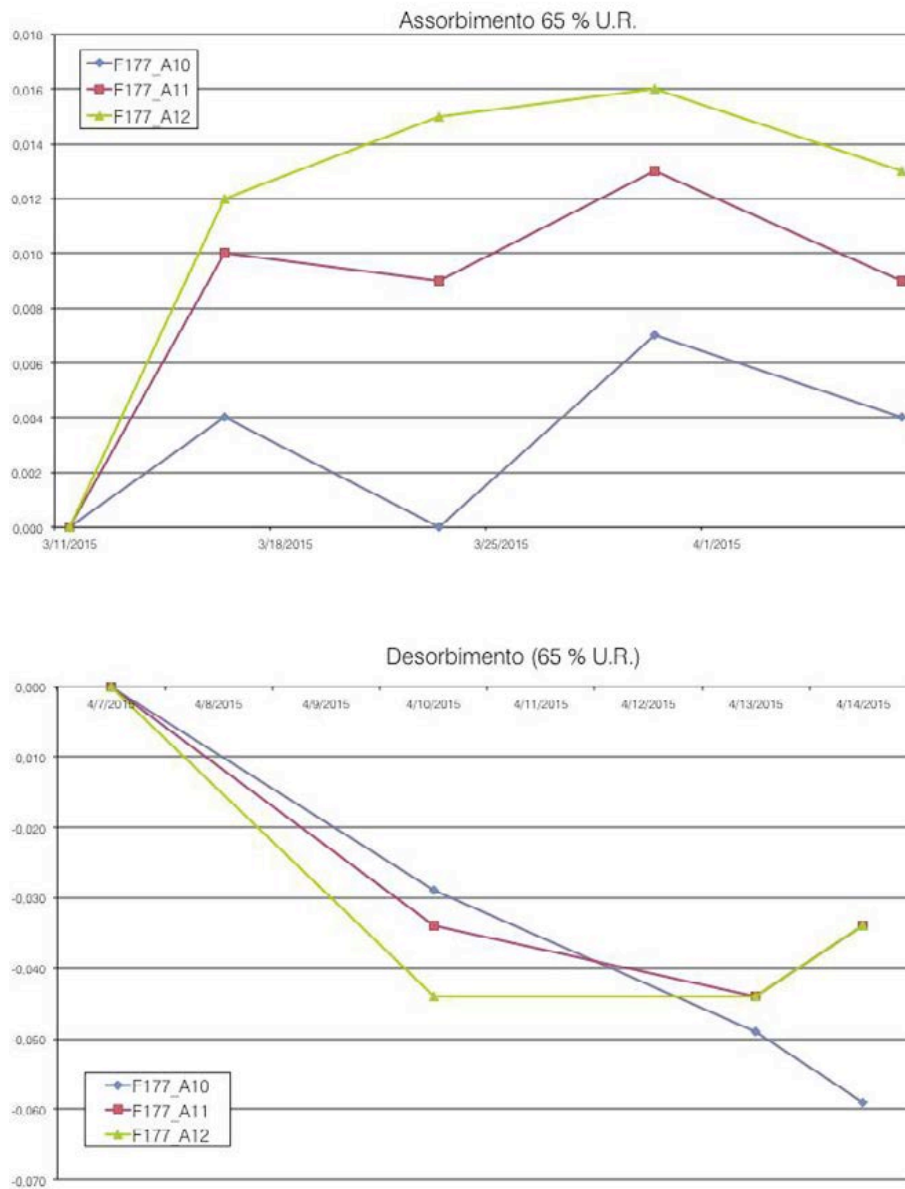


Figure 4.24, 4.25. Grafici di assorbimento e desorbimento igroscopico per i campioni di calcarenite esposti a un'umidità relativa del 65% (23°C).

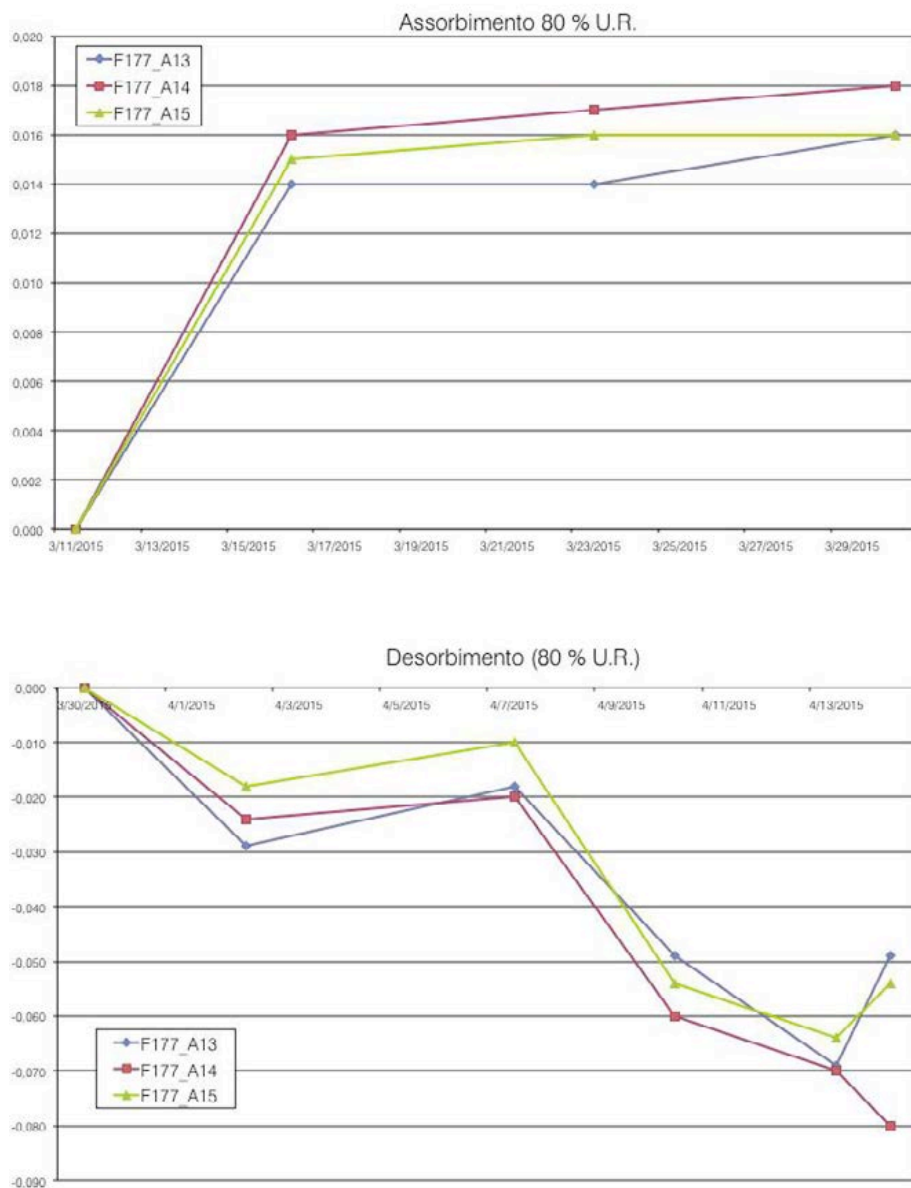


Figure 4.26, 4.27. Grafici di assorbimento e desorbimento igroscopico per i campioni di calcarenite esposti a un'umidità relativa dell'80% (23°C).

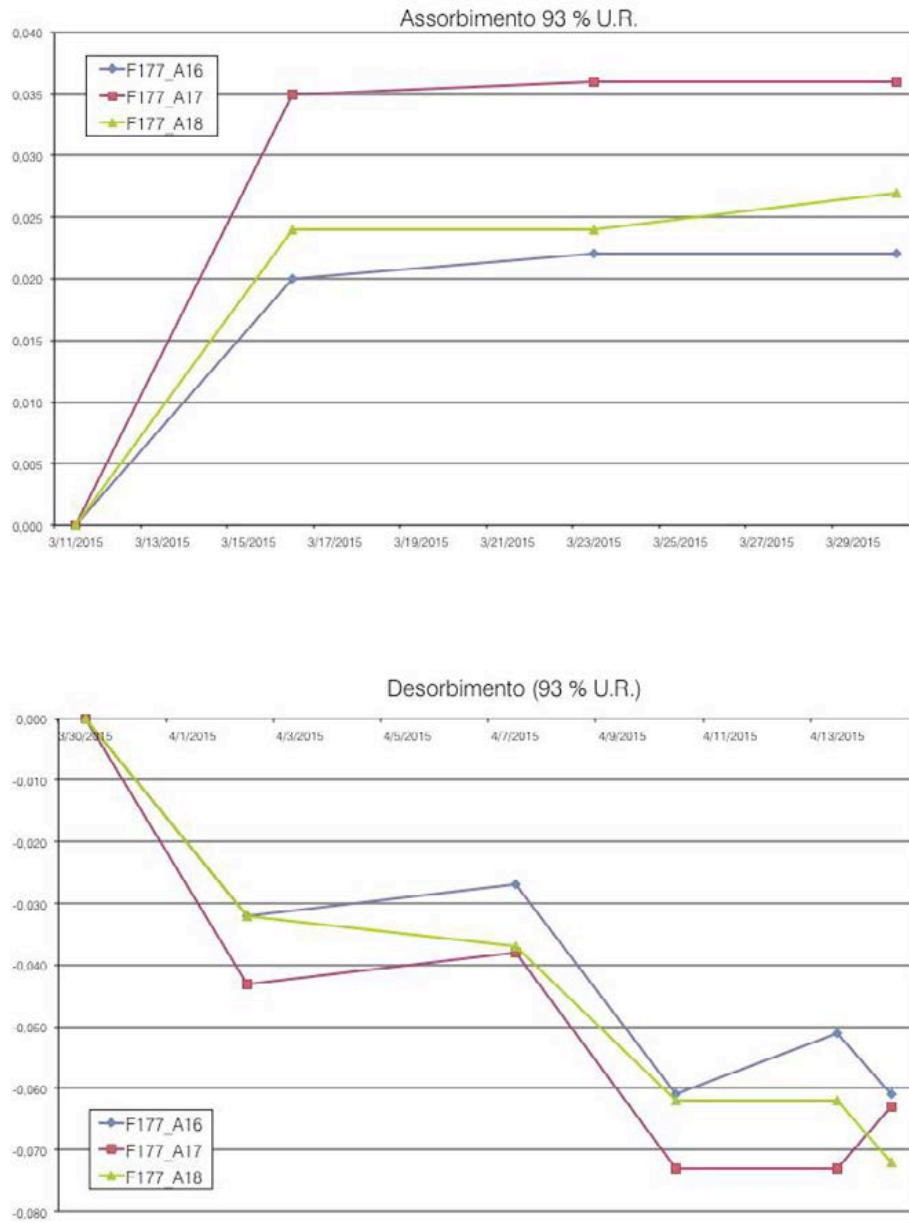


Figure 4.28, 4.29. Grafici di assorbimento e desorbimento igroscopico per i campioni di calcarenite esposti a un'umidità relativa del 93% (23°C).

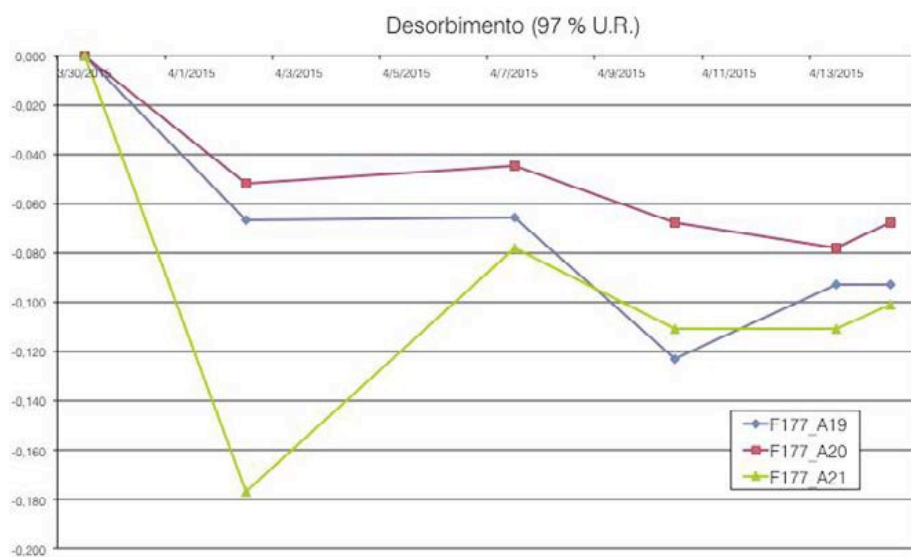
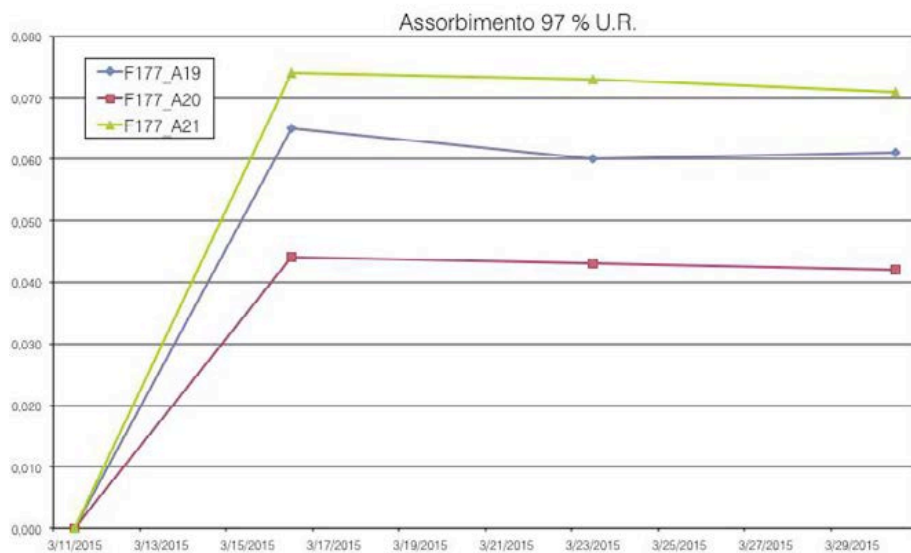


Figure 4.30, 4.31. Grafici di assorbimento e desorbimento igroscopico per i campioni di calcarenite esposti a un'umidità relativa del 97% (23°C).

Infine, la curva di asciugamento è stata determinata secondo un metodo di prova interno ai laboratori dell'istituto Fraunhofer IBP. Questo consiste nel saturare d'acqua il campione per immersione e nel sigillarlo poi lateralmente con un foglio di alluminio. Il provino è posto ad asciugare in un ambiente a temperatura e umidità relativa controllate (23°C e 50%). Se ne misura dunque la variazione di peso nel tempo, sino al completo asciugamento. Nella curva che si ricava possono evidenziarsi una prima fase legata alle condizioni in cui la prova si svolge (in termini di temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria) e una seconda che dipende dalle caratteristiche del materiale.

Per la calcarenite indagata la prova è stata condotta su due campioni (A22 e A23). Questi, pesati allo stato secco, sono stati mantenuti immersi in acqua per ventisette giorni, ovvero fino allo stabilizzarsi delle misure ponderali intorno a un valore costante, indicativo della completa imbibizione dei provini. Ne è risultato un contenuto d'acqua di saturazione pari al 31,48% in volume per il provino A22 e al 34,97% per l'A23, da cui un valore medio del 33,22%. La prova di asciugamento è stata condotta per ventitré giorni.

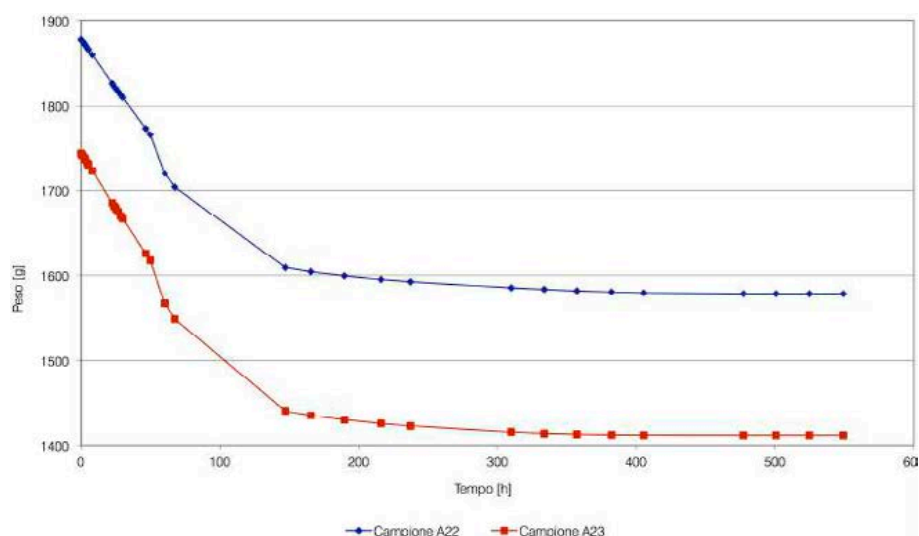


Figura 4.32. Curve di asciugamento per i campioni A22 e A23.



Figure 4.33, 4.34. Campioni della calcarenite A sottoposti alla prova di asciugamento.

4.4 Misure in opera di conduttanza termica: le murature del complesso monumentale di Sant'Anna alla Misericordia

Le misure in opera di conduttanza termica sono state condotte sulle murature del complesso di Sant'Anna alla Misericordia, palazzo nobiliare, poi convento francescano, in seguito scuola e oggi sede della Galleria d'Arte Moderna di Palermo. L'edificio mostra una ricca casistica di murature, realizzate in diverse epoche e quindi con materiali e modalità costruttive differenti. Inoltre i rilevanti danni sismici che la fabbrica ha subito nei secoli hanno comportato numerosi interventi di consolidamento e introdotto ulteriori disomogeneità nelle murature. Sul complesso monumentale sono disponibili studi storico-archivistici approfonditi (Li Castri, 1999), che pur non facendo luce su tutte le fasi della storia edilizia del convento forniscono su di esso importanti informazioni costruttive. A queste si aggiungono quelle reperibili nei documenti progettuali e di cantiere relativi all'intervento di recupero del 1996-2006, che ha portato alla trasformazione in sede museale.



Figure 4.35, 4.36. Complesso monumentale di Sant'Anna alla Misericordia, a Palermo: *a destra*, la dimora di Gaspare Bonet; *a sinistra*, l'estensione del convento nel "viridario" del palazzo.

Il nucleo più antico dell'ex convento francescano è costituito dal palazzo del mercante catalano Gaspare Bonet che, probabilmente edificato in parte su fabbriche preesistenti, era già in costruzione nel 1488 e sicuramente completato prima del 1525; organizzata intorno a un cortile, la dimora comprendeva anche un giardino privato. Come hanno evidenziato i lavori di recupero, le murature, oggi in buona parte a vista, sono realizzate in conci di calcarenite grigia a grana fine proveniente da cave urbane, impiegata in conci

intagliati sia per gli elementi decorativi sia per i cantonali, che serrano campi murari caratterizzati da un apparecchio meno pregiato. Tali murature sono costituite da due paramenti che, connessi da un massimo di due diatoni per ogni metro quadrato di superficie, delimitano un riempimento interno in pezzi informi di calcarenite legati con malta di calce aerea e pozzolana. Nel corso del restauro, a causa della presenza di vuoti e della qualità meccanica scadente della malta, è stata iniettata nelle murature una miscela di grassello di calce stagionata e pozzolana con aggiunta di additivi fluidificanti. Gli interventi di “scuci e cuci” e l’occlusione di vani di porte e finestre sono stati eseguiti adoperando conci di calcarenite. L’intonaco originario, ove presente, ha uno spessore di circa 3 cm sui paramenti interni e 4 cm su quelli esterni.



Figura 4.37. Piano terra del convento di Sant’Anna alla Misericordia. Sono indicate: *in verde* le murature tardoquattrocentesche e cinquecentesche, realizzate con calcarenite di cave urbane; *in rosso* le murature settecentesche e settecentesche, costituite da pietre di cave extra-urbane; *in blu* murature ottocentesche, probabilmente in calcarenite di Aspra (disegno basato sugli elaborati grafici del “Progetto di completamento” redatto da D. De Angelis Ricciotti, M. Li Castri e T. Martelli).

Il palazzo e il "viridario" furono venduti nel 1618 ai padri francescani dell'attiguo convento di Santa Maria della Misericordia, i quali adattarono la dimora di Bonet alle esigenze conventuali, attraverso l'inserimento di un nuovo piano e la suddivisione degli ambienti interni, e impiegarono il giardino per realizzare l'attuale grande chiostro, strettamente connesso al palazzo attraverso la costruzione di uno scalone monumentale, ultimato nel 1648. Il convento e l'attigua chiesa, essendo costruiti su terreno alluvionale, sono stati danneggiati seriamente dagli eventi sismici che nei secoli hanno colpito la città. Si ha notizia che, a causa del terremoto del 1726, una delle catene metalliche del chiostro si tranciò e che di conseguenza si lesionarono le volte e i soprastanti dormitori dei frati. Il convento fu quindi oggetto di opere di consolidamento, che interessarono certamente il piano superiore del chiostro. È probabile che siano conseguenti al sisma del 1726 anche i vasti interventi di sostituzione muraria che interessarono il basamento dell'antico palazzo Bonet. Le murature secentesche e settecentesche del complesso, compresa la sopraelevazione del braccio meridionale del chiostro (che, eretta nel 1771, comportò anche la riconfigurazione della fronte su strada), furono realizzate con conci squadri di calcarenite proveniente da cave extraurbane, con spessori d'intonaco di circa 3 cm sul lato interno e 4 cm su quello esterno.

A seguito del passaggio alla proprietà pubblica per effetto delle leggi eversive, nella seconda metà del XIX secolo il convento è stato oggetto di profondi stravolgimenti, al fine di adattarlo a nuove funzioni, in particolare a quella scolastica. Le opere murarie risalenti a questo periodo furono realizzate con apparecchi di conci squadri di calcarenite a grana grossa, rivestiti con strati d'intonaco di circa 3 cm.

4.4.1 Obiettivi e metodo

Le misure di conduttanza termica svolte sulle murature del convento di Sant'Anna mirano a indagare la corrispondenza tra i valori di calcolo della trasmittanza termica e le prestazioni misurate in opera, anche in relazione alla varietà di calcareniti e apparecchi murari presenti. Pertanto lo studio è stato condotto sia sull'antico nucleo del palazzo Bonet sia sull'ala meridionale del chiostro secentesco, prospiciente la via Sant'Anna e sopraelevato nella seconda metà del XVIII secolo. Il primo ospita la mostra permanente della Galleria d'Arte Moderna, la seconda è adibita a uffici.

Le misure sono suddivise in tre gruppi. Del primo fanno parte le nove prove relative alla parete meridionale del chiostro, esposta quasi perfettamente a Nord e quindi favorevole allo svolgimento della prova secondo le indicazioni della norma ISO 9869:1994. Le misure sono state condotte, nell'inverno 2013-2014, sulle tre elevazioni della struttura. Per ciascuna sono stati indagati più punti, date le consistenti opere di consolidamento di cui le fonti storiche danno notizia, soprattutto a seguito del terremoto del 1726.

Le misure del secondo e del terzo gruppo, rispettivamente sette e quattro, sono state condotte sulle pareti del palazzo Bonet e sono molto eterogenee per esposizione. Una serie è stata svolta nell'estate del 2014, l'altra nell'inverno 2014-2015. Le misure estive mirano

a sopperire alla scarsa differenza fra temperature interna ed esterna che si registra nelle condizioni climatiche di Palermo: negli ambienti riscaldati difficilmente il divario supera i 7°C e si attesta spesso sotto i 5°C. D'estate, invece, sempre per gli ambienti climatizzati questa differenza supera facilmente i 10°C durante le ore diurne, riducendosi però sensibilmente durante la notte. Proprio per questa maggiore variabilità le procedure di prova descritte in letteratura, che riguardano aree caratterizzate da un inverno ben più rigido di quello palermitano, consigliano di svolgere la prova soltanto nei mesi freddi. Pertanto le misure più significative fra quelle svolte d'estate sono state ripetute in inverno nella medesima posizione e costituiscono le determinazioni del terzo gruppo. Esse consentono di verificare i risultati delle misure estive ma anche di fare un confronto più omogeneo con le indagini relative all'ala meridionale del chiostro, nella quale peraltro la presenza del solo impianto di riscaldamento garantisce una sufficiente differenza di temperatura fra gli spazi interni e l'ambiente esterno soltanto nei mesi invernali.

I risultati delle misure sono stati confrontati con i valori ottenuti secondo la procedura di calcolo descritta nella norma UNI EN ISO 6946:2008. Per quasi tutti gli spessori murari indagati, inoltre, è stata possibile anche una comparazione con le indicazioni dell'abaco murario della UNI/TR 11552:2014 e con i valori tabellari di trasmittanza termica riportati nella stessa norma.

4.4.2 Procedimento di misura

Le misure sono state condotte secondo la procedura non distruttiva indicata nella norma ISO 9869:1994. Si è adoperato un *data logger* Ahlborn Ahlmemo 2960-8, al quale per mezzo di fili sono stati collegati un sensore di flusso termico e quattro termocoppie (Cu-CuNi). Il primo, con substrato in resina epossidica, ha dimensioni pari a 250x250x1,5 mm (la parte sensibile al flusso ha lato di 220 mm); in tutte le prove il sensore è stato applicato al paramento murario interno e senza schermo protettivo (ANIT, 2013), il cui utilizzo non è attestato nelle procedure di prova descritte negli studi citati. Le sonde di temperatura sono state impiegate a coppie sulla superficie esterna e su quella interna, ma per alcune misure si è utilizzato un solo sensore. Le termocoppie interne sono state poste in prossimità della piastra di flusso termico; per quelle esterne la posizione migliore, in corrispondenza del termoflussimetro, è stata possibile soltanto per le misure 3, 4, 5 e 6 del primo gruppo grazie all'accessibilità da una terrazza esterna. Inoltre, per l'assenza di balconi e sporti pronunciati, in tutti i punti di misura le termocoppie esterne sono state esposte alla pioggia.

Per non danneggiare i paramenti murari, i sensori sono stati fissati con nastro adesivo di carta. Il colore di questo approssima abbastanza bene le caratteristiche superficiali degli intonaci bianchi e di quelli decorati, che rivestono buona parte delle pareti indagate; risulta invece più chiaro delle calcareniti, che sono a vista in alcune delle murature del palazzo Bonet. La sostituzione del nastro di fissaggio durante la prova si è resa necessaria soltanto per i sensori di temperatura esterna ed è stata fatta in genere ogni cinque giorni e comunque sempre a seguito di pioggia. Durante l'estate, invece, il nastro è stato cambiato ogni due giorni per il rapido asciugamento dell'adesivo.

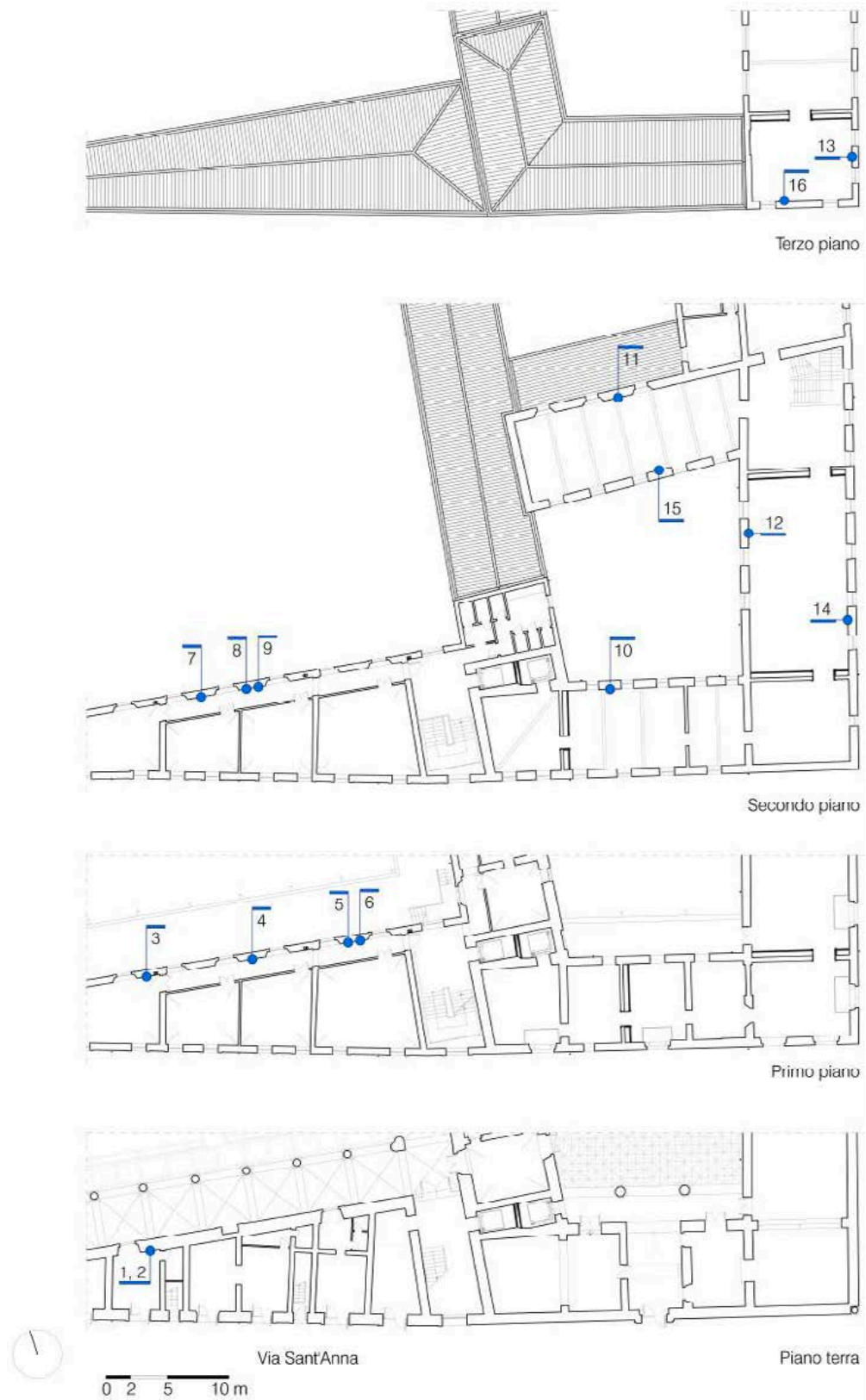


Figura 4.38. Localizzazione dei punti di misura (disegno basato sugli elaborati grafici del "Progetto di completamento" redatto da D. De Angelis Ricciotti, M. Li Castri e T. Martelli).



Figure 4.39, 4.40. Punti di misura 1 e 2 (a sinistra) e posizione del sensore esterno di temperatura (a destra).



Figure 4.41, 4.42. A sinistra il punto di misura 3, a destra l'immagine termografica, che evidenzia il cavedio.



Figure 4.43, 4.44. Punti di misura 4 (a sinistra), 5 e 6 (a destra).



Figure 4.45, 4.46. Punti di misura 7 (*a sinistra*), 8 e 9. Durante le misurazioni il radiatore è rimasto spento.



Figure 4.47, 4.48. Punto di misura 10 (*a sinistra*) e posizione dei sensori esterni di temperatura (*a destra*).



Figure 4.49, 4.50. Punto di misura 11, che, come i 10 e 12, si trova dietro i pannelli delle sale espositive.



Figure 4.51, 4.52. Punto di misura 12 (*a sinistra*) e posizione dei sensori esterni di temperatura (*a destra*).



Figure 4.53, 4.54. Punto di misura 13 (*a sinistra*) e posizione dei sensori esterni di temperatura (*a destra*).



Figure 4.55, 4.56. Punto di misura 14 (*a sinistra*) e posizione dei sensori esterni di temperatura (*a destra*).



Figure 4.57, 4.58. Punto di misura 15 (a sinistra) e posizione dei sensori esterni di temperatura (a destra).



Figure 4.59, 4.60. Punto di misura 16 (a sinistra) e posizione dei sensori esterni di temperatura (a destra).

Seguendo le indicazioni della norma, la scelta dei punti di misura si è basata su un'indagine termografica (figg. 4.41, 4.61-4.64), volta a individuare discontinuità, ponti termici, tubazioni e cavedi non visibili. In particolare si è verificato che per un intorno di circa un metro di diametro la temperatura superficiale non variasse per più di 2 °C. I punti di misura scelti sono in posizione intermedia fra vano d'apertura e parete trasversale, fra pavimento e soffitto. Si sono evitate zone particolarmente esposte a correnti d'aria o alla sosta delle persone, vicine ad apparecchi elettrici, d'illuminazione artificiale o di climatizzazione.

La norma ISO 9869:1994 indica in settantadue ore la durata minima di una misura qualora la temperatura sia stabile intorno al sensore di flusso termico. Per tener conto dell'inerzia delle murature storiche, tuttavia, sono necessari periodi di monitoraggio ben più lunghi: Baker (2011) suggerisce che il rilevamento dei dati duri almeno due settimane ma molte delle sue esperienze sono state protratte fino a un mese¹⁶; lo stesso procedimento è seguito da Rye e Scott (2012); in Adhikari et al. (2012) la durata è di 180÷220 ore per pareti spesse da 100 a 160 cm; Bellotti e Sangalli (2014) riportano una durata media di prova compresa fra 120 ore (cinque giorni) per un primo insieme di misure e 168 ore (sette giorni) per le successive. Per le prove qui esposte, attraverso alcune misure preliminari, condotte nell'inverno 2013-2014 sulle pareti del primo piano del chiostro, è risultato sufficiente un periodo di monitoraggio di quattordici giorni per spessori murari di circa 60 cm; per sezioni

maggiori, di quasi un metro, la durata di prova è stata di tre settimane; per alcune delle misure estive, condotte su murature spesse circa 60 cm, sono stati sufficienti undici giorni perché i risultati convergessero secondo le indicazioni della ISO 9869:1994.

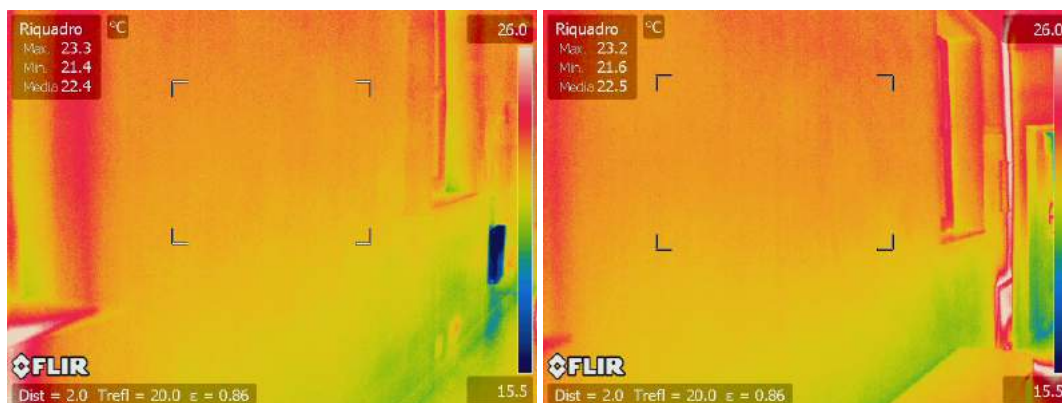


Figure 4.61, 4.62. Immagini termografiche relative ai punti di misura 4 (a sinistra) e 5-6 (a destra).

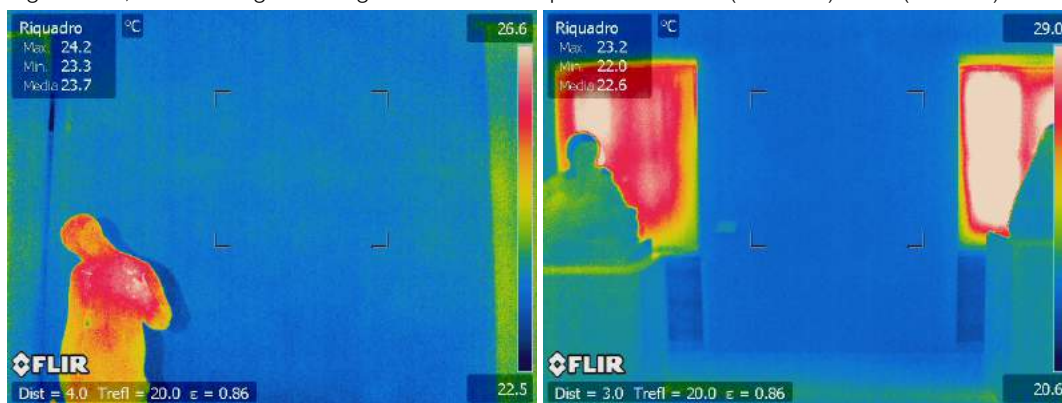


Figure 4.63, 4.64. Immagini termografiche relative ai punti di misura 14 (a sinistra) e 15 (a destra).

L'intervallo di registrazione dei dati, secondo la norma ISO 9869, è tipicamente pari a trenta minuti o a un'ora se si adopera il metodo delle medie progressive. Le procedure esposte in letteratura riportano in genere durate minori, per limitare l'incidenza sui risultati della perdita temporanea di segnale (nel caso della strumentazione senza fili) e dei molti fattori, quali il passaggio di persone, che possono influire istantaneamente sulle misure, soprattutto di flusso termico. In Baker (2011) i dati dei sensori sono raccolti nei *data logger* a intervalli di cinque secondi¹⁷ e ne viene calcolata la media ogni dieci minuti. Bellotti e Sangalli (2014) riportano invece un intervallo di campionamento di trenta minuti per il primo insieme di misure, dieci minuti per il secondo. Nelle misure palermitane qui esposte, i dati misurati dai sensori sono acquisiti dal *data logger* a intervalli di 180 secondi, mentre per l'elaborazione dei risultati si è fatto riferimento a una cadenza temporale di dieci minuti, i cui valori sono la media di quelli raccolti secondo l'intervallo di campionamento fissato.

Dai dati rilevati per il flusso termico e le temperature superficiali si è ricavata la conduttanza termica seguendo il metodo delle medie progressive descritto dalla norma ISO 9869, applicato con l'impiego del programma SUBB. La trasmittanza termica è stata cal-

colata come reciproco della somma della resistenza della parete e delle resistenze superficiali indicate dalla UNI EN ISO 6946:2008 per le superfici verticali, cioè $0,04 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ per quella esterna e $0,13 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ per quella interna.

4.4.3 Criteri di calcolo

La trasmittanza termica delle murature indagate è stata calcolata secondo la procedura indicata nella norma UNI EN ISO 6946:2008. Per gli intonaci si è fatto riferimento agli stessi valori di conducibilità che la UNI/TR 11552:2014 utilizza nell'abaco delle strutture murarie, ovvero $0,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ per il rivestimento interno e $0,90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ per quello esterno. Per la parte strutturale della parete, seguendo la norma UNI EN 1745:2012 si è determinata una conducibilità termica propria della muratura, media fra quella del materiale lapideo e quella della malta, pesata sulla base delle percentuali che i due materiali rispettivamente occupano nella sezione muraria. Per la malta si è fatto riferimento alla conducibilità termica che la UNI 10351:2015 riporta per le "malte di calce e di calce e cemento". Per i conci, invece, si sono considerate due alternative: il valore $0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ che sempre la UNI 10351 assegna ai "tufi" con massa volumica di $1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; il valore $0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ che la UNI EN 1745 riporta per i calcari molto morbidi ($\rho \leq 1.590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), che equivale alla conducibilità termica che la UNI EN ISO 10456 assegna sia alle "rocce naturali sedimentarie leggere" ($\rho = 1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) sia ai "calcari molto morbidi" ($\rho = 1.600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Non disponendo di dati qualitativi o quantitativi sul contenuto di malta delle pareti indagate, i calcoli sono stati svolti assumendo che questo costituisca il 10%, il 25% o il 40% della sezione muraria. Nei calcoli si sono tralasciati sia il contenuto di umidità sia i vuoti interni alla muratura. Nel primo caso tale scelta è confortata dal fatto che la posizione di quasi tutti i punti di misura esclude almeno le possibilità di umidità di risalita. L'errore commesso nel tralasciare i vuoti, invece, è mitigato dal fatto che le murature esaminate sono state oggetto, nel corso del restauro dell'edificio, di interventi di consolidamento e in particolare di iniezioni di malta.

Int. est./ Muratura/ Int. int. [cm]	Punto di misura	TRASMITTANZA TERMICA CALCOLATA					
		[W·m ⁻² ·K ⁻¹]					
		Calcarenite 90% Malta 10%		Calcarenite 75% Malta 25%		Calcarenite 60% Malta 40%	
		"Tufo" $\rho = 1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	"Natural, sedimentary rock, light"	"Tufo" $\rho = 1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	"Natural, sedimentary rock, light"	"Tufo" $\rho = 1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	"Natural, sedimentary rock, light"
4/90/2	1, 2	0,620	0,772	0,652	0,778	0,684	0,783
4/50/2	3, 4, 5, 6	0,996	1,208	1,042	1,215	1,086	1,223
7/50/2	7, 8, 9	0,964	1,161	1,007	1,168	1,048	1,175
3/66/2	10, 12	0,809	0,996	0,849	1,003	0,888	1,009
3/63/2	11	0,840	1,032	0,881	1,040	0,921	1,046
0/56/2	13	0,952	1,172	0,998	1,180	1,044	1,187
0/66/2	14,16	0,832	1,030	0,874	1,038	0,915	1,044
0/67/2	15	0,821	1,018	0,862	1,025	0,904	1,032

Tabella 4.11. Valori di trasmittanza termica calcolati.

4.4.4 Risultati

Il primo gruppo di misure è stato condotto su tre elevazioni della parete meridionale del chiostro. In base alla documentazione progettuale e di cantiere, questa muratura, intonacata su entrambi i paramenti, è realizzata con conci squadrati di calcarenite. Al piano terra è stato possibile condurre due misure su punti distanti circa 0,8 m. In corrispondenza di questi la parete, risalente all'epoca di costruzione del chiostro (prima metà del XVII secolo) ha uno spessore complessivo di 96 cm, dei quali circa 4 di intonaco esterno; quello interno, realizzato durante l'intervento di recupero dell'edificio, è costituito da una malta di calce applicata a spruzzo e rifinita con un rasante, per uno spessore complessivo di 2 cm. Nel corso delle misurazioni, prolungate per ventuno giorni, la differenza media fra temperatura esterna e interna è stata di 4,5 °C per il punto 1 e 4,4 °C per il punto 2 (tab. 4.12). I valori di conduttanza determinati sulla base delle misure sono pari a 0,62 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ per il punto 1 e 0,71 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ per il punto 2, cui corrisponde una trasmittanza di 0,56 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ e 0,63 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ rispettivamente.

Al primo piano la muratura, sicuramente consolidata dopo il sisma del 1726, ha uno spessore medio di 56 cm; l'intonaco esterno ha spessore variabile intorno a 4 cm, mentre l'interno è analogo a quello del piano terra ma rifinito con uno stucco spesso 2 mm. Sono state condotte quattro misure (indicate con i numeri da 3 a 6). La misura 3 ha riguardato una porzione di muratura, omogenea all'analisi termografica, compresa fra un vano di finestra e un ponte termico, costituito da un cavedio che alloggia i discendenti pluviali, ricavato nello spessore murario dal lato interno (figg. 4.41 e 4.42). È stato determinato un valore di conduttanza di 1,31 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, da cui una trasmittanza di 1,07 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$; quelli relativi alle altre misure di piano sono rispettivamente 1,14 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, 1,26 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, 1,21 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ (in termini di trasmittanza, 0,95 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, 1,04 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, 1,01 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$). Diversamente dalle altre tre, la misura 4, condotta nel mese di febbraio, è stata prolungata sino a venti giorni per via di condizioni climatiche esterne più variabili.

Al secondo piano, che in base alle fonti d'archivio (Li Castri, 1999) fu realizzato nel 1771, lo spessore murario è mediamente pari a 59 cm; infatti, mentre l'intonaco interno è del tutto analogo a quello del livello sottostante, all'esterno, a seguito dell'intervento di recupero, lo spessore dell'intonaco è stato incrementato di circa 3 cm rispetto a quello del piano inferiore. Sono state condotte tre misure, ciascuna della durata di tredici giorni, con una differenza media di temperatura di 7,5 °C per la misura 7, 4,0 °C per la 8 e 4,2 °C per la 9. I valori di conduttanza rilevati sono rispettivamente 1,25 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$, 1,30 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ e 1,28 $W \cdot m^{-2} K^{-1}$.

Nella parte del complesso monumentale costituita dal palazzo Bonet, le misure riguardano le murature del secondo piano e l'ultima elevazione della torre. Non è stato possibile indagare quelle dei piani inferiori soprattutto per l'inaccessibilità dei serramenti apribili, che fortemente limita l'impiego di strumenti muniti di filo; in alcuni casi, invece, la vicinanza delle installazioni museali al paramento murario ha impedito di svolgere l'analisi termografica e non avrebbe consentito di posizionare il sensore di flusso a sufficiente distanza dagli stipiti delle aperture.

Delle murature indagate a palazzo Bonet due sono esposte a nord. Su queste sono state condotte misure sia nel periodo estivo (E10 ed E11) sia in quello invernale (10 e 11). Le murature sono intonacate su entrambi i paramenti; il rivestimento interno, realizzato durante l'intervento di recupero, è spesso circa 2 cm, mentre l'intonaco esterno, sempre in base alle informazioni fornite dai progettisti, ha uno spessore compreso fra 3 e 4 cm. Le sale in cui si trovano le due pareti sono a diretto contatto con la copertura e soffrono le variazioni di temperatura esterna in misura maggiore rispetto agli altri ambienti. Ciò ha ridotto sensibilmente l'accuratezza delle misurazioni, in particolare di quelle estive.

Il punto 10 riguarda una muratura dello spessore di 71 cm. La misura svolta nel periodo invernale ha avuto una durata di quattordici giorni, con un valore medio della differenza di temperatura fra interno ed esterno di 7,2 °C. I risultati indicano una conduttanza termica di $1,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e dunque una trasmittanza di $0,87 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Nel periodo estivo, invece, la misura è stata protratta per venti giorni nel mese di giugno, ma la variabilità della temperatura e la frequente inversione della direzione del flusso termico non ha consentito l'impiego dei dati raccolti.

In corrispondenza del punto 11, invece, la muratura è spessa 68 cm. La misura invernale, della durata di ventuno giorni, ha registrato una differenza di temperatura mediamente pari a 6,7 °C e indica una conduttanza termica di $0,93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Da questa discende una trasmittanza di $0,81 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Nel periodo estivo, invece, la misura, protratta per sedici giorni nel mese di luglio, ha registrato una sensibile variazione della temperatura esterna; per effetto di un suo abbassamento, negli ultimi quattro giorni si è verificata un'inversione di senso del flusso. Neanche in questo caso è stato possibile adoperare i dati raccolti per determinare la conduttanza e la trasmittanza termica della parete.

Intonacata su entrambi i paramenti è anche la parete orientale del cortile del palazzo (71 cm), esposta a occidente, sulla quale la rilevazione invernale (punto 12) è durata sedici giorni. In inverno il valore medio di conduttanza rilevato è pari a $0,96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, quello di trasmittanza a $0,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. La misura estiva (E12), invece, contrariamente alle altre, ha indicato valori inferiori rispetto a quelli invernali, cioè $0,82 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $0,72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ rispettivamente.

Infine, le altre misure svolte sulle murature esterne del palazzo Bonet hanno riguardato murature intonacate sul paramento interno ma non su quello esterno. Soltanto per una di queste (punto 13) è stato possibile rilevare la conduttanza sia in inverno sia in estate. Si tratta della parete dell'ultima elevazione della torre esposta a est, dello spessore di 58 cm. La misura, protratta per ventuno giorni, indica una conduttanza di $1,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e una trasmittanza di $0,86 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. La misura estiva (E13, durata dodici giorni) indica invece valori sensibilmente maggiori, rispettivamente $1,54 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $1,22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Le ultime tre misure sono state condotte soltanto nel periodo estivo su pareti esposte rispettivamente a sud-est-est (punto 14), a sud (punto 15) e a sud-sud-ovest (punto 16). La durata è stata rispettivamente di undici, sei e dieci giorni.

Le tre misure mostrano una buona convergenza dei risultati in un tempo relativamente

breve e valori abbastanza omogenei. Nella muratura del secondo piano esposta a sud-est-est, spessa 68 cm, si sono rilevati una conduttanza termica di $1,28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e una trasmittanza di $1,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Nella parete esposta a sud, dello spessore di 69 cm, i risultati sono rispettivamente $1,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $0,99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Infine, per la muratura della torre, esposta a sud-sud-ovest, di 68 cm, si sono determinati una conduttanza di $1,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e una trasmittanza di $1,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Tuttavia, le notevoli discrepanze fra le misure invernali e quelle estive, che si sono evidenziate per le altre murature, suggeriscono che i risultati siano verificati ripetendo la rilevazione in inverno.

Guardando ai valori tabellari di trasmittanza termica contenuti nella norma UNI/TR 11552:2014, sono confrontabili con le misure svolte soltanto spessori di 55 e 60 cm. I dati relativi alle “murature di pietrame intonacate”, rispettivamente $2,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $2,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, sono anche più che doppi rispetto ai valori relativi alle sezioni murarie indagate di spessore simile; invece quelli relativi a “murature di mattoni semipieni o tufo”, $0,96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $0,90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, ad eccezione del punto 4, sono inferiori in misura non superiore al 15%.

Anche i valori che l'abaco contenuto nella stessa norma indica per “pareti in pietra” di spessori paragonabili a quelli delle murature indagate sono più che doppi rispetto ai risultati delle determinazioni svolte. Per sezioni murarie di 64 cm (di cui quattro d'intonaco), la norma indica una trasmittanza di $2,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, mentre i valori ottenuti in opera per spessori anche inferiori (56 cm) non superano $1,07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Analogamente, contro valori di $1,68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per quelle di 94 cm e $1,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per pareti di 74 cm, si sono rilevate trasmittanze non superiori a $0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $1,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ rispettivamente. Invece sono sensibilmente inferiori, in misura sino al 24%, i valori che l'abaco indica per le “murature in blocchi squadrati di tufo”, ovvero $0,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per murature spesse 64 cm (anche in questo caso è incluso lo spessore dei rivestimenti) e $0,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ per sezioni di 74 cm. Non sono riportati valori per strutture più massicce.

Infatti, per la tipologia delle “pareti in pietra” la norma assegna al materiale lapideo una conducibilità termica di $2,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, mentre ai “blocchi squadrati di tufo” attribuisce un valore di $0,55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Adoperando invece il criterio che la UNI EN 1745 descrive per determinare la conducibilità termica del materiale lapideo a partire dalla trasmittanza della muratura¹⁸, dai risultati delle misure si ottiene un valore medio di $0,71 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Ciò contribuisce a spiegare anche il confronto con i valori calcolati secondo la UNI EN ISO 6946:2008. Tenendo conto dell'incertezza che affligge le misure in opera di trasmittanza termica, che la norma ISO 9869:1994 stima compresa fra il 14% e il 28%, si riscontra un buon accordo tra le misure e la trasmittanza calcolata facendo riferimento alle caratteristiche del “tufo” ($\lambda=0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1.500 \text{ kg}/\text{m}^3$, UNI 10351). Per le sole misure invernali, infatti, lo scostamento è compreso fra +16,4% e -5,0% nell'ipotesi che il contenuto di malta sia pari al 25%. Invece la conducibilità delle “rocce naturali sedimentarie leggere” ($\lambda=0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1.500 \text{ kg}/\text{m}^3$, UNI EN ISO 10456:2008) induce a una sovrastima anche consistente della trasmittanza, fra il 10,2% e il 38,9%.

Punto di misura	Spessore murario [m]	T _{Int, media} °C	T _{est, media} °C	ΔT _{media} °C	Conduttanza termica [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Trasmittanza termica [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
1	0,96	20,5	15,6	4,5	0,62	0,56
2	0,96	20,5	15,4	4,4	0,71	0,63
3	0,56	21,0	14,0	4,8	1,31	1,07
4	0,56	20,6	14,0	6,1	1,14	0,95
5	0,56	20,0	14,1	5,9	1,26	1,04
6	0,56	20,0	14,1	5,9	1,21	1,01
7	0,59	19,6	12,1	7,5	1,25	1,03
8	0,59	19,4	14,5	4,0	1,30	1,06
9	0,59	19,2	14,8	4,2	1,28	1,05
10	0,71	19,1	11,9	7,2	1,02	0,87
10 estiva	0,71	24,2	25,8	-1,6 (-10,4/+4,3)	-	-
11	0,68	17,7	11,0	6,7	0,93	0,81
11 estiva	0,68	25,7	26,1	-0,4 (-7,3/+5,8)	-	-
12	0,71	20,0	12,0	8,0	0,96	0,83
12 estiva	0,71	24,8	28,7	-3,9 (-12,7/+1,0)	0,82	0,72
13	0,58	18,8	16,4	2,4	1,01	0,86
13 estiva	0,58	23,9	28,6	-4,7 (-16,5/+1,5)	1,54	1,22
14 estiva	0,68	25,2	29,6	-4,4 (-17,4/+1,5)	1,28	1,05
15 estiva	0,69	25,6	30,1	-4,5 (-14,2/+1,6)	1,19	0,99
16 estiva	0,68	24,3	30,1	-5,8 (-19,7/+0,9)	1,26	1,04

Tabella 4.12. Risultati delle misure svolte.

Punto di misura	Spessore murario [m]	ΔU _{tufu-mis}			ΔU _{sedim-mis}		
		Malta 10%	Malta 25%	Malta 40%	Malta 10%	Malta 25%	Malta 40%
1	0,96	+10,7%	+16,4%	+22,1%	+37,9%	+38,9%	+39,8%
2	0,96	- 1,6%	+3,5%	+8,6%	+22,5%	+23,5%	+24,3%
3	0,56	- 6,9%	- 2,6%	+1,5%	+12,9%	+13,6%	+14,3%
4	0,56	+4,8%	+9,7%	+14,3%	+27,2%	+27,9%	+28,7%
5	0,56	- 4,2%	+0,2%	+4,4%	+16,2%	+16,8%	+17,6%
6	0,56	- 1,4%	+3,2%	+7,5%	+19,6%	+20,3%	+21,1%
7	0,59	- 6,4%	- 2,2%	+1,8%	+12,7%	+13,4%	+14,1%
8	0,59	- 9,1%	- 5,0%	- 1,1%	+9,5%	+10,2%	+10,9%
9	0,59	- 8,2%	- 4,1%	- 0,2%	+10,6%	+11,2%	+11,9%
10	0,71	- 7,0%	- 2,4%	+2,8%	+14,5%	+15,3%	+16,0%
10 Estiva	0,71	-	-	-	-	-	-
11	0,68	+3,7%	+8,8%	+13,7%	+27,4%	+28,4%	+29,1%
11 Estiva	0,68	-	-	-	-	-	-
12	0,71	-2,5%	+2,3%	+7,0%	+20,0%	+20,8%	+21,6%
12 Estiva	0,71	+12,4%	+17,9%	+23,3%	+38,3%	+39,3%	+40,1%
13	0,58	+10,7%	+16,0%	+21,4%	+36,3%	+37,2%	+38,0%
13 Estiva	0,58	- 22,0%	- 18,2%	- 14,4%	- 3,9%	- 3,3%	- 2,7%
14 Estiva	0,68	- 20,8%	- 16,8%	- 12,9%	- 1,9%	- 1,1%	- 0,6%
15 Estiva	0,69	- 17,1%	- 12,9%	- 8,7%	+2,8%	+3,5%	+4,2%
16 Estiva	0,68	- 20,0%	- 16,0%	- 12,0%	- 1,0%	- 0,2%	+0,4%

Tabella 4.13. Confronto fra i valori di trasmittanza termica desunti dalle misurazioni svolte e quelli calcolati.

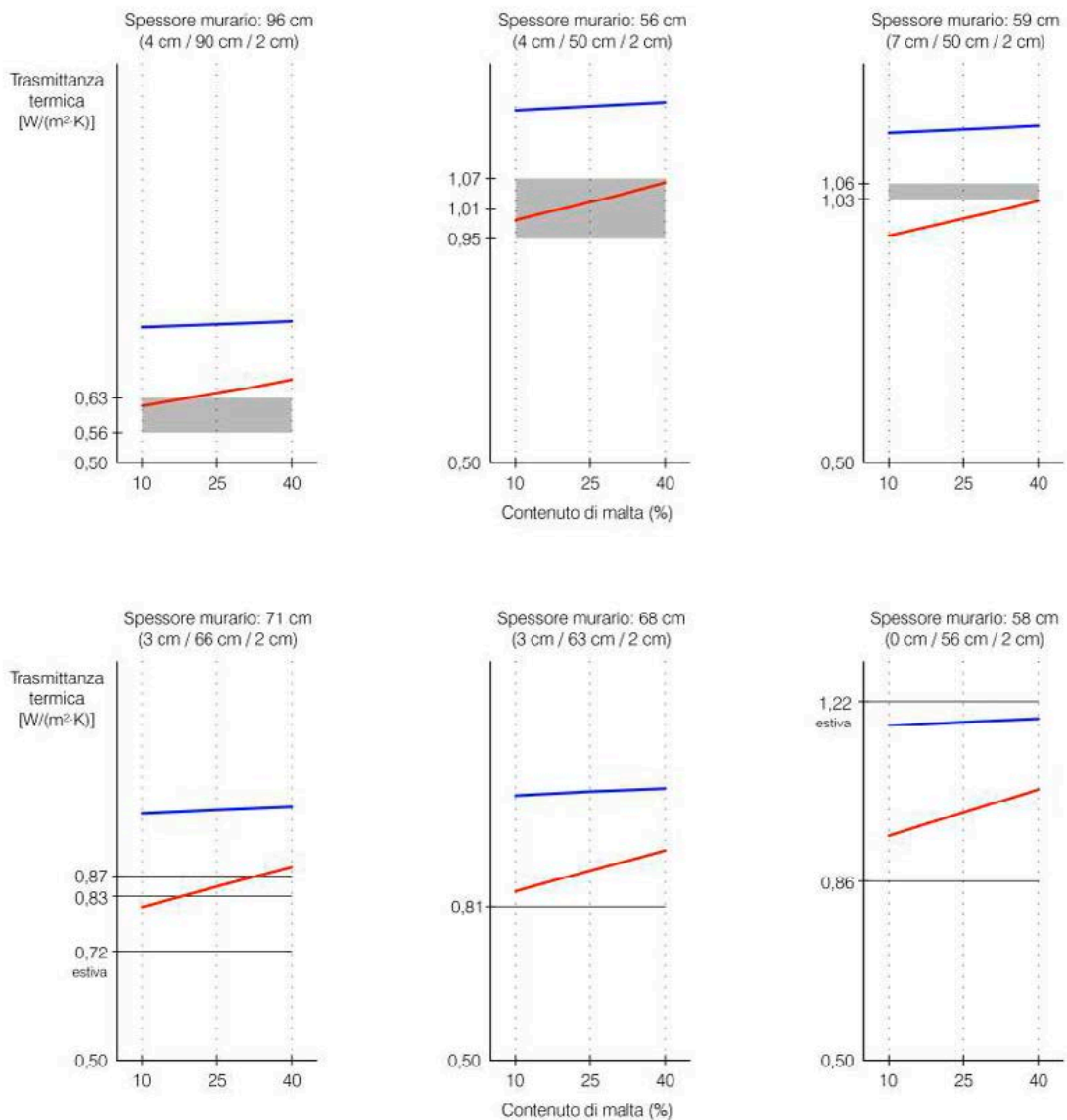


Figura 4.65. Confronto fra i valori di trasmittanza termica ricavati dalle misure e quelli calcolati secondo la norma UNI EN ISO 6946:2008. Nei grafici relativi al primo gruppo di misure (chostro monumentale), nel quale sono stati indagati più punti delle medesime murature, si è rappresentato con una fascia grigia l'intervallo di valori desunti dalle misurazioni. Per gli altri gruppi di determinazioni, invece, la trasmittanza di calcolo è indicata da una linea nera. In rosso sono indicati i risultati di calcolo ottenuti adoperando i dati della norma UNI 10351:2015 ("tufi", $\rho=1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda=0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), in blu quelli ottenuti con i valori della UNI EN 1745:2012 (calcarci molto morbidi, $\rho\leq 1.590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda=0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

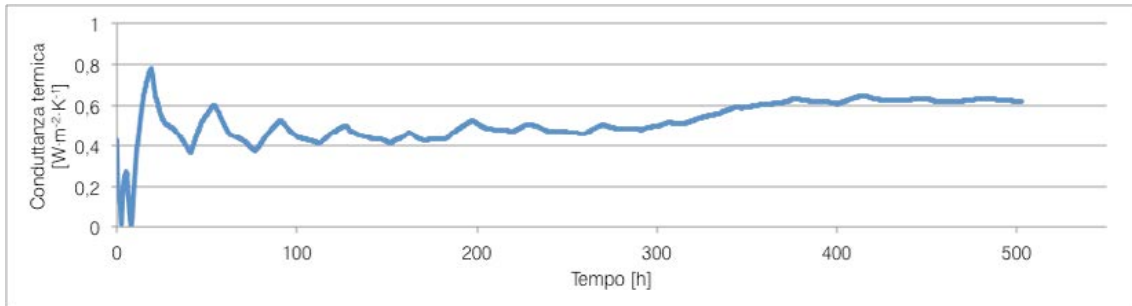


Figura 4.66. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 1.

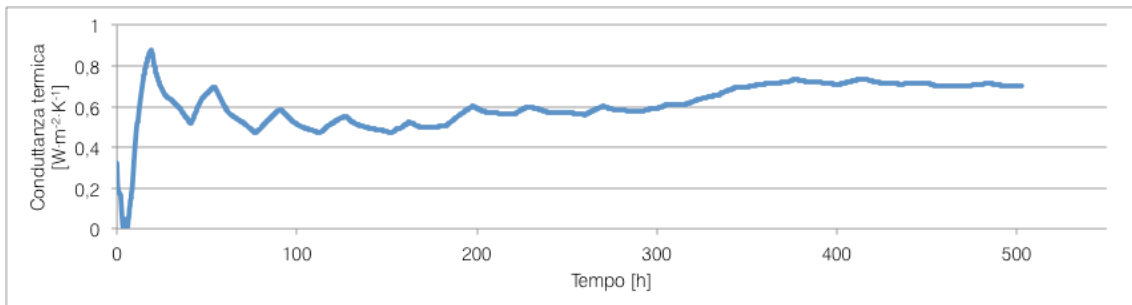


Figura 4.67. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 2.

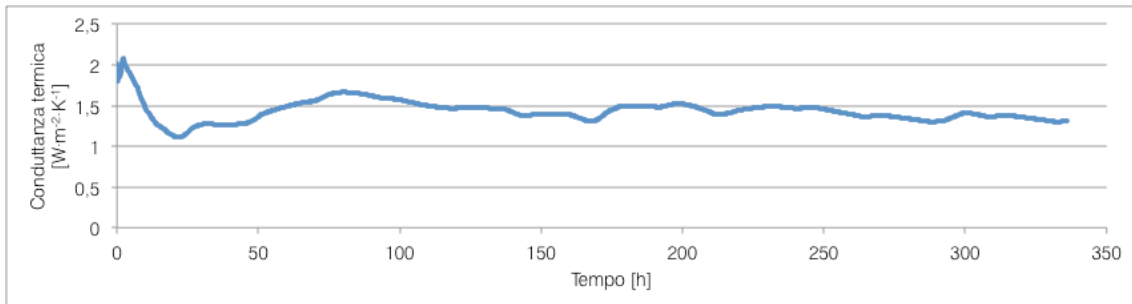


Figura 4.68. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 3.

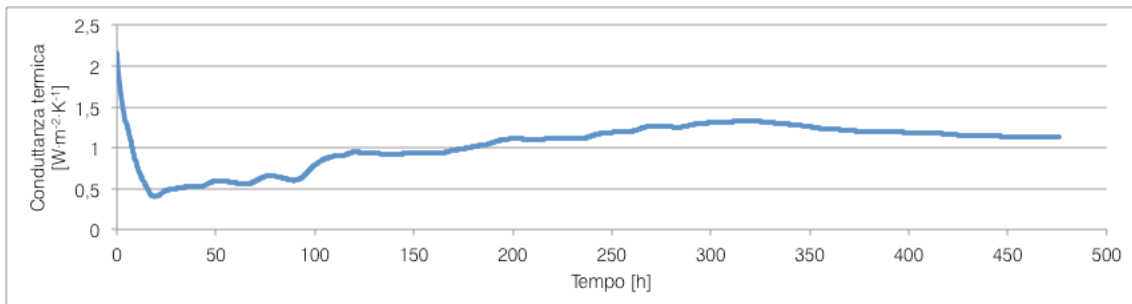


Figura 4.69. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 4.

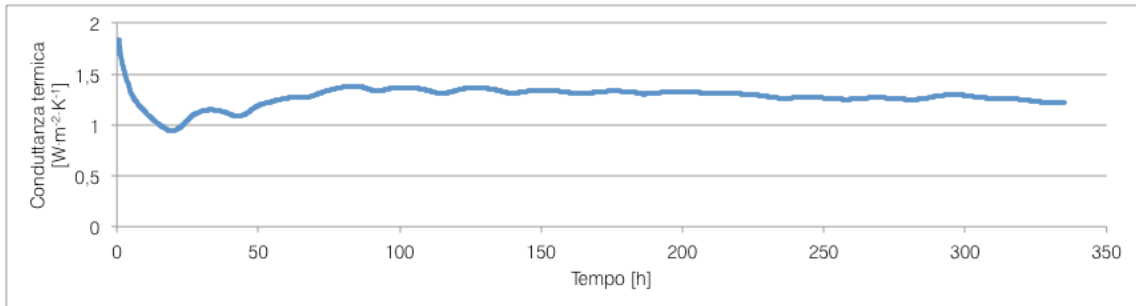


Figura 4.70. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 5.

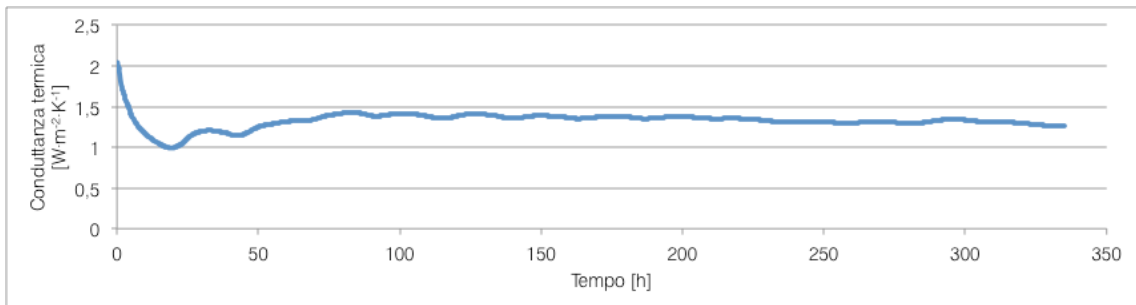


Figura 4.71. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 6.

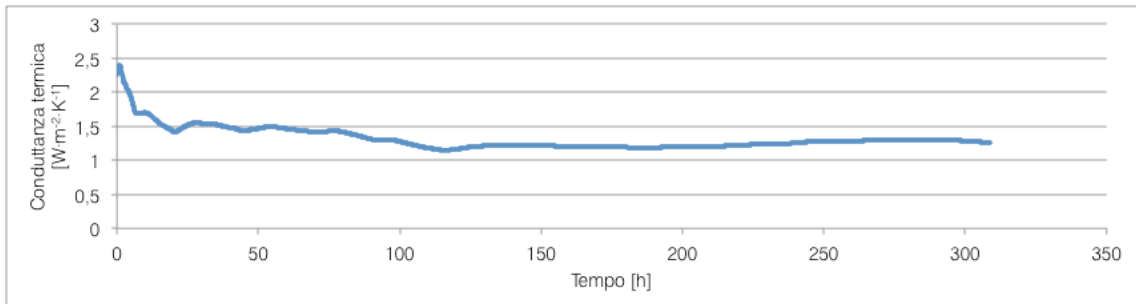


Figura 4.72. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 7.

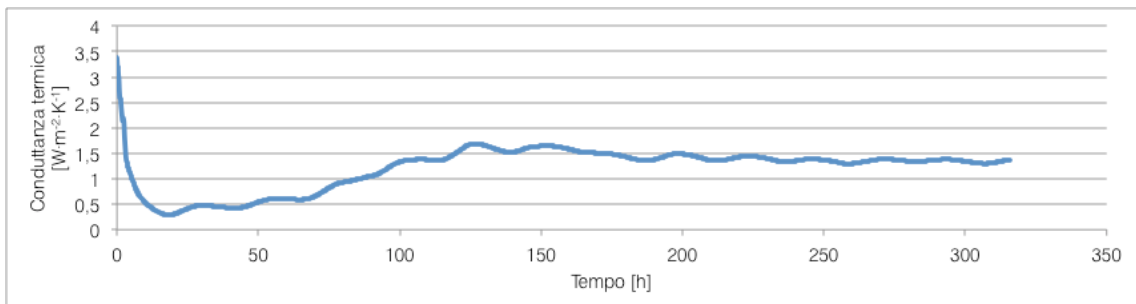


Figura 4.73. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 8.

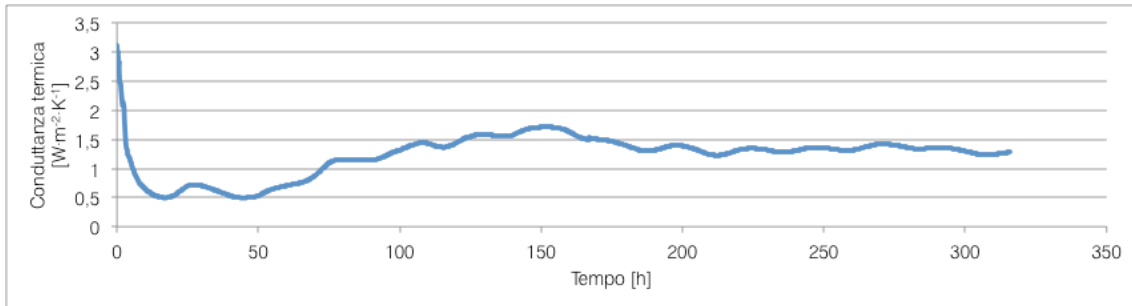


Figura 4.74. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 9.

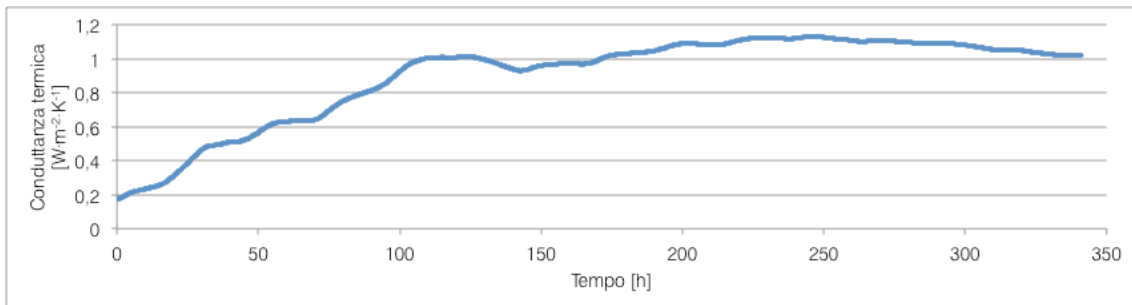


Figura 4.75. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 10.

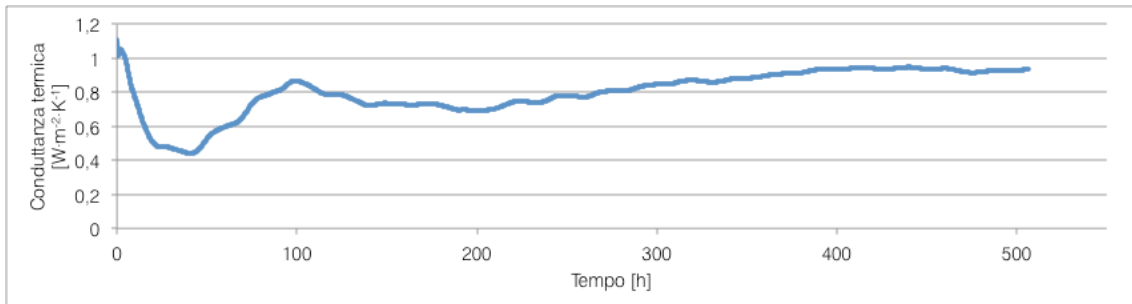


Figura 4.76. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 11.

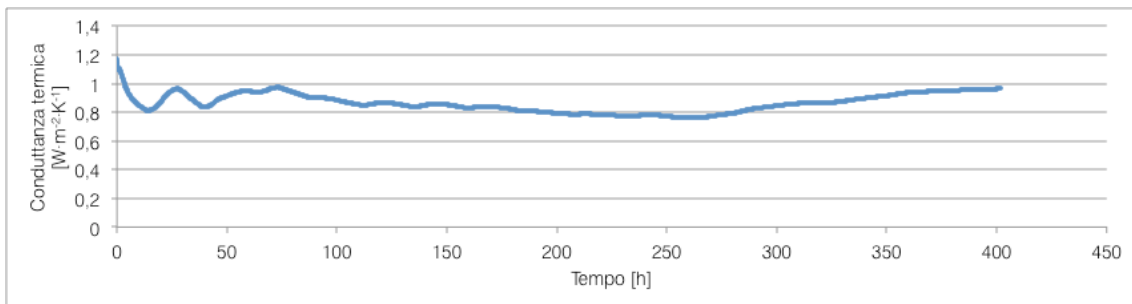


Figura 4.77. Conduttanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 12.

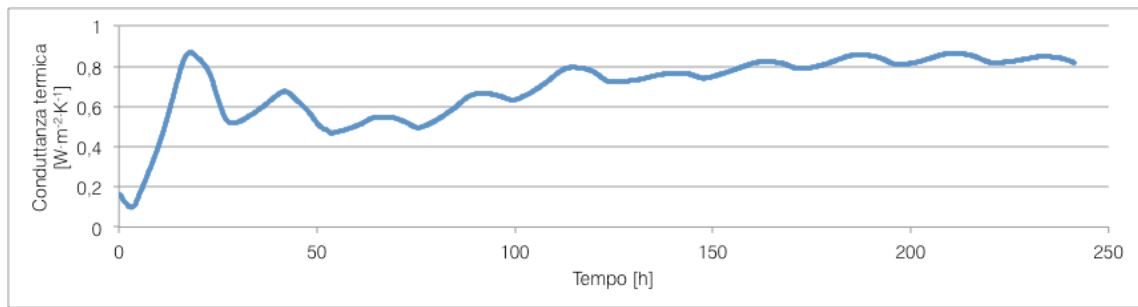


Figura 4.78. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 12 (misura estiva).

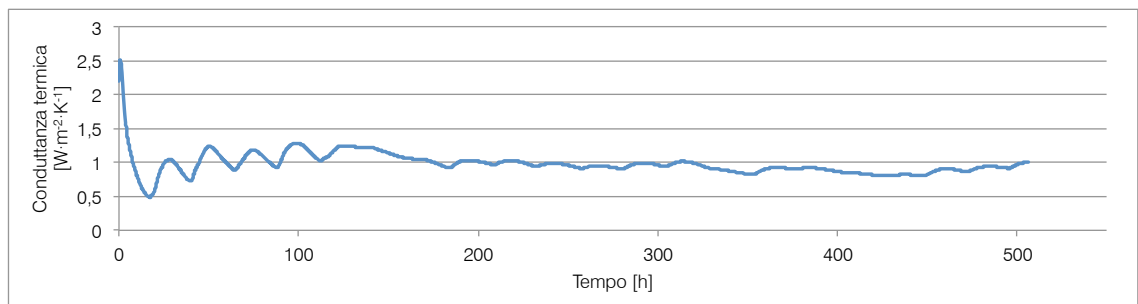


Figura 4.79. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 13.

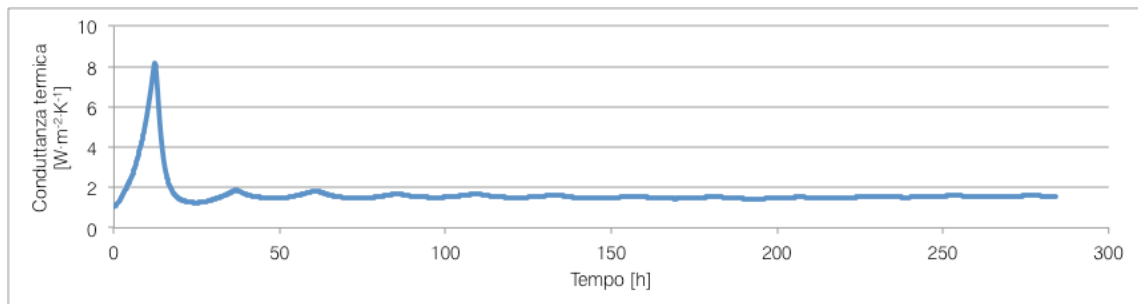


Figura 4.80. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 13 (misura estiva).

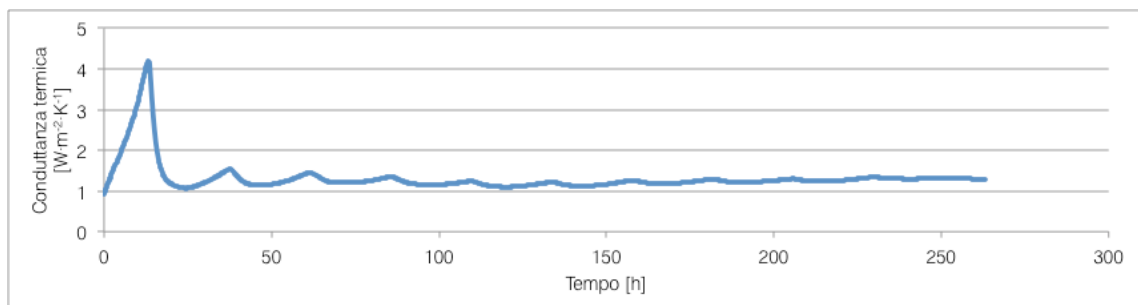


Figura 4.81. Conducibilità termica media in funzione del tempo per il punto di misura 14.

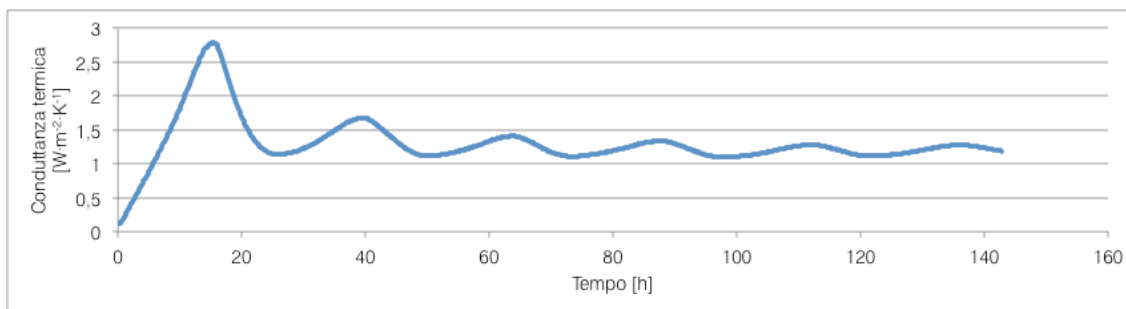


Figura 4.82. Conduzzanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 15.

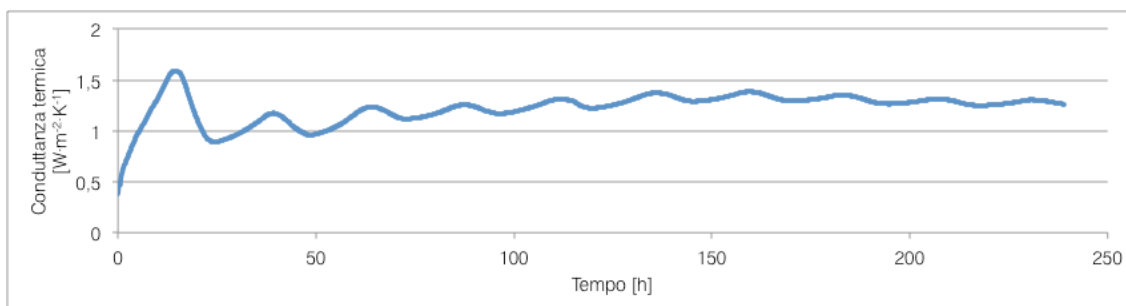


Figura 4.83. Conduzzanza termica media in funzione del tempo per il punto di misura 16.

Note

¹ Si ringraziano per il prezioso aiuto l'Ufficio Territoriale dell'ENEA in Sicilia (Palermo), in particolare nella persona dell'ing. Francesco Cappello, e l'arch. Mario Li Castri. Si ringraziano inoltre la direzione e il personale della Galleria d'Arte Moderna di Palermo, e la società A.M.G. Energia di Palermo.

² La differenza è rilevante soprattutto quando la pietra ha un'alta conducibilità termica. Nello studio di Baker, se le murature sono schematizzate con un solo strato di lapideo naturale, a seconda di quest'ultimo e delle sue caratteristiche termiche la trasmittanza calcolata può aumentare sino al 30% rispetto ai calcoli nei quali si ipotizza il massimo contenuto di malta, pari al 40% dello spessore murario.

³ Le misure sono state svolte secondo la norma ISO 8301.

⁴ Solo a partire dalla fine del XIX secolo e nel corso del XX l'attività delle vecchie cave è stata soppiantata dalla diffusione delle calcareniti estratte nel trapanese e della pietra di Sabucina, impiegate ancora oggi largamente nella costruzione di tramezzi e tamponamenti.

⁵ Per le rocce la norma UNI 10351:1994 riporta soltanto la massa volumica del materiale secco e la conduttività utile di calcolo, mentre non dà valori di permeabilità al vapore.

⁶ Questi valori sono relativi al frattile del 50%. La norma li riporta anche per il frattile del 90%, ma raccomanda i primi per il calcolo della prestazione energetica degli edifici perché questo, riguardando il fabbricato e non i singoli prodotti, adopera valori di trasmittanza basati sulla resistenza termica media degli elementi per muratura.

⁷ La massa volumica reale (*true density*) di un materiale è il rapporto fra la massa del materiale secco e il volume della matrice solida, priva cioè del volume della porosità accessibile.

⁸ Nel picnometro a elio il gas inerte occupa tutti i pori accessibili del materiale e consente di misurare il loro volume.

⁹ La corrispondente norma italiana è la UNI EN 12664:2002, "Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per l'edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti secchi e umidi con media e bassa resistenza termica".

¹⁰ La corrispondente norma italiana è la UNI EN ISO 12572:2006, "Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore d'acqua".

¹¹ Come la norma UNI EN ISO 12572 evidenzia, le prove in recipiente secco danno informazioni sulle prestazioni dei materiali per bassi valori di umidità, quando il trasporto è controllato dalla diffusione del vapore. Le pro-

ve a recipiente umido, invece, rendono conto delle prestazioni dei materiali in condizioni di elevata umidità.

¹² La corrispondente norma italiana è la UNI EN ISO 15148:2003, "Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per immersione parziale.

¹³ Il provino è immerso, secondo la norma, per 5 ± 2 mm sopra il punto più alto della sua superficie di base.

¹⁴ Le misure di peso sono state eseguite dopo 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300, 360 e 1440 minuti dall'inizio della prova.

¹⁵ La corrispondente norma italiana è la UNI EN ISO 12571:2013, "Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico".

¹⁶ L'autore evidenzia come sia necessaria almeno una settimana affinché la stima della trasmittanza termica approssimi, con uno scostamento del 5%, il valore determinato con una misura di circa quattro settimane.

¹⁷ Per alcuni dei *data logger* impiegati l'intervallo di campionamento è di uno o due minuti.

¹⁸ Il metodo consente di determinare la conducibilità del materiale asciutto a 10°C, dunque l'applicazione che si espone non ne segue rigorosamente le condizioni. Il criterio consiste nel determinare innanzitutto una conducibilità equivalente della parete come rapporto fra il suo spessore e la sua conduttanza, $\lambda_{10,dry,mas} = d \cdot [(U_{10,dry,mas})^{-1} - R_{si} - R_{se}]$. La conducibilità del materiale lapideo si ricava, infine, tenendo conto della sua proporzione con la malta, secondo la relazione $\lambda_{10,dry,unit} = (100 \cdot \lambda_{10,dry,mas} - a_{mor} \cdot \lambda_{10,dry,mor}) \cdot a_{unit}^{-1}$, nella quale $\lambda_{10,dry,mor}$ è la conducibilità termica della malta, a_{mor} è l'area percentuale di malta e a_{unit} quella dei conci lapidei.

Bibliografia

Adhikari, R. S., Lucchi, E., & Pracchi, V. (2012). Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings. In J. Reiser, C. Jiménez, & S. Biondi Antúñez de Mayolo (a cura di), *Proceedings of the 28th International PLEA Conference. Convegno tenuto a Lima, Perù, 7-9 novembre 2012*.

Adhikari, R. S., Lucchi, E., & Pracchi, V. (2013). Energy modelling of historic buildings: applicability, problems and compared results. In A. Troi, & E. Lucchi (a cura di), *Cultural Heritage Preservation EWCHP 2013: Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, 16-18 settembre 2013* (pp. 119-125). Milano: Felix Verlag editrice.

Alaimo, R., Giarrusso, R., & Montana, G. (2008). *I materiali lapidei dell'edilizia storica di Palermo. Conoscenza per il restauro*. Enna: IlionBooks.

Anderson, B. (2006). *Conventions for U-value calculations* (2006 edition). BRE Scotland.

ANIT. (2013). *La misura della trasmittanza in opera*. Milano: TEP srl.

Baggio, P., Bison, P.G., Bonacina, C., Bressan, C., Grinzato, E., Marinetti, S., & Mazzoldi, A. (1993). *Determinazione di caratteristiche termofisiche del tufo*. In M. Stella (a cura di), *Atti del convegno internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese"*. Convegno tenuto a Bari, 26-28 maggio 1993 (pp. 437-452). CNR.

Baker, P. (2008). *Technical Paper 2. In situ U-value measurements in traditional buildings - Preliminary results*. Historic Scotland.

Baker, P. (2011). *Technical Paper 10. U-values and traditional buildings. In situ measurements and their comparisons to calculated values*. Historic Scotland.

Baker, P. (2013a). *Research into the thermal performance of traditional brick walls. Research report 1. Research into the thermal performance of traditional walls: solid brick walls*. English Heritage.

Baker, P. (2013b). *Research into the thermal performance of traditional brick walls. Research report 2. Thermal conductivities of three traditional bricks*. English Heritage.

Bellotti, A. & Sangalli, P. (2014). La trasmittanza termica e l'edilizia storica: metodi di calcolo a confronto. *Neo-Eubios* 49, 5-14.

Bondi, P., Cardinale, N., Di Tommaso, R. M., & Nino, E. (1993). *Misure di conduttanza termica di pareti poste in opera: confronto tra murature in tufo pugliese ed in altri materiali*. In M. Stella (a cura di), *Atti del convegno internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese"*. Convegno tenuto a Bari, 26-28 maggio 1993 (pp. 409-418). CNR.

Campisi, T., & Mutolo, S. (2003). *Palermo pietra su pietra. Apparecchi murari dell'edilizia settecentesca*. Palermo: Ila Palma.

De Blasi, L., & Castiglia, E. (1891). Ricerche fisico-igieniche sui materiali da costruzione comunemente usati in Palermo. *Rivista d'igiene e sanità pubblica*, anno II, n. 22, 865-886.

De Blasi, L., & Castiglia, E. (1893). Ricerche sulla trasmissione del calore nei materiali da costruzione comunemente adoperati in Palermo. *Rivista d'igiene e sanità pubblica*, 637-644.

De Blasi, L., & La Manna, D. (1892). Sulla permeabilità all'aria dei materiali da costruzione. *Rivista d'igiene e sanità pubblica*, 273-280.

Fatta, G. (1993). *Esperienze ottocentesche sui tufi calcarei siciliani*. In M. Stella (a cura di). *Atti del convegno internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese"*. Convegno tenuto a Bari, 26-28 maggio 1993 (pp. 145-160). CNR.

Fatta, G. (1996). La fabbrica del Teatro Massimo. *Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo*, 1.

Fatta, G. (2012). Architettura e tecnica nella costruzione del Teatro Massimo V.E. di Palermo. *Meccanica dei Materiali e delle Strutture*, 2 (2), 1-39.

Fricano, G. (1999). *La calcarenite dell'area bagherese: l'utilizzazione storica ed attuale, le caratteristiche meccaniche e litologiche* (Tesi di laurea). Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia.

Giovanetti F. (a cura di). (1997). *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Palermo: Flaccovio Editore.

La Duca, R. (1964). *Cave di tufo del palermitano*. Estratto dal n. 3-4 del Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Palermo. Palermo: G. Denaro editore.

Li Castri, M. (1999). *La dimora di Gaspare Bonet a Palermo. Studi e ipotesi di restauro* (Tesi di laurea). Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia.

Lucchi, E., & Pracchi, V. (a cura di). (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*. Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.

Mongelli, F., Scirucchio, V., & Walsh, N. (1993). *Parametri termo-fisici dei tufi calcarei pugliesi*. In M. Stella (a cura di). *Atti del convegno internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese"*. Convegno tenuto a Bari, 26-28 maggio 1993 (pp. 329-350). CNR.

Montana, G., & Scaduto, R. (1999). *La pietra d'Aspra: storia e utilizzo*. Palermo: Flaccovio Editore.

Moye, C. (1980). *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Batiment n. 215. Cahier 1682. Coefficients K des parois des batiments anciens*. Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB).

Rhee-Duverne, S., & Baker, P. (2013). *Research into the thermal performance of traditional brick walls. Executive summary*. English Heritage.

Rye, C., & Scott, C. (2012). *The SPAB research report 1. U-value report*. SPAB.

Stella, M., & Madio, C. (1993). *Caratterizzazione termoenergetica del tufo: applicazioni in soluzioni costruttive tradizionali e correnti*. In M. Stella (a cura di). *Atti del convegno internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese"*. Convegno tenuto a Bari, 26-28 maggio 1993 (pp. 419-436). CNR.

Stephan, E., & Caucheteux, A. (2014). *Réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau. Loire Anjou Touraine*. DREAL Pays de la Loire.

Vinci, C. (2003). *La sostenibilità in edilizia: Criteri e regole dell'arte per il costruire "sano"* (Tesi di Dottorato). Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia.

ISO 9869:1994. Thermal insulation - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

UNI 10351:2015. Materiali e prodotti per l'edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto.

UNI 10355:1994. Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.

UNI EN 1745:2012. Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche.

UNI EN ISO 6946:2008. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.

UNI EN ISO 10456:2008. Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto.

UNI/TR 11552:2014. Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici.

CAPITOLO 5

Tecniche d'intervento per il miglioramento energetico

Techniques for the energy improvement of historic buildings

ABSTRACT - *The scientific literature enumerates several techniques to improve the thermal comfort and energy performance of historic buildings. As for recent constructions, the largest number of these measures aims at reducing the heating consumption, but the interest in the Mediterranean context and the need for cooling is increasing. These techniques are analysed in relation to their thermal and hygrometric effects on the historic components and the risks of decay. Their applicability is discussed also concerning the impact on the element appearance and the opportunities deriving from structural interventions.*

The examination of the allowable techniques is referred to the building components they are applied to. For the opaque envelope, the main routes are the increasing of thermal resistance and, to limit overheating, the reduction of solar gains. The application of reflective coatings on historic masonry has little evidence in scientific literature. The main efforts are directed to the thermal insulation of solid and cavity walls, whose possibilities and limits are investigated regarding the hygrometric features of insulating materials and the restrictions connected to inner space solutions and decorations. For roof and attic spaces, reflective coatings and their chromatic effect are analysed on the base of current studies and existing applications, while the employment of thermal insulation is discussed also in relation to space accessibility.

Concerning windows and doors, the improvement of the existing ones is compared to their substitution, with the latter providing higher performance and the former allowing the conservation of historic significance and natural resources. Single glass substitution, air tightness and selective coatings are discussed in the light of connected risks and restrictions. Furthermore, the analysis involves the connections between components, both opaque and transparent, where intervention is arduous, since relevant risks of mould growth, energy leakage and local discomfort are related to these points but breathability has to be maintained.

The examination carried out in this chapter focuses mainly on the performance improvement of the building envelope. However, a correct assessment of energy efficiency and indoor environment quality has to consider the interaction between the

construction and its active systems. Therefore, the analysis concludes with a short account about this topic and its recent trends and results. Notably, the main solutions for indoor climate control and the integration of renewable resources are synthetically exposed and observations about their impact, such as the need of technical spaces and ducts, are expressed.

Il miglioramento delle prestazioni energetiche e ambientali di un edificio consiste in un insieme integrato di interventi che coinvolgono i suoi elementi tecnici, soprattutto d'involucro, e gli impianti. La loro scelta si basa sulla compatibilità fisica con la costruzione e sul bilanciamento fra il costo economico e i risparmi conseguibili. Tuttavia, in un'ottica di sostenibilità, la progettazione deve guardare anche all'impatto ambientale degli interventi in termini di consumo di materiali, trasporti, smaltimento dei rifiuti, rischi per la salute dei lavoratori edili e degli utilizzatori.

Nell'ambito dell'architettura storica l'obiettivo d'incrementare le prestazioni energetiche deve confrontarsi anche e soprattutto con le esigenze della conservazione e dunque con principi come quelli di minimo intervento, reversibilità, distinguibilità, che sono propri della disciplina del restauro. Anche in ragione delle molte questioni che l'integrazione impiantistica pone nel recupero degli edifici (Carbonara, 2001), la via di una riduzione dei consumi attraverso il solo miglioramento degli impianti appare il percorso meno impervio per limitare l'impatto sulla fabbrica storica ma anche sulle teorie e sulle pratiche consolidate del restauro.

In molti edifici di pregio, la necessaria presenza di impianti rende accettabile l'intervento di miglioramento energetico, che spesso sfrutta le canalizzazioni esistenti e si concentra sull'efficienza degli apparecchi di generazione e distribuzione, sulla loro funzione intermittente o continua, sulle condizioni termiche, igrometriche e luminose da garantire, in relazione alle caratteristiche geometriche e dimensionali degli ambienti. Del resto, agire sui sistemi d'illuminazione, di produzione e accumulo dell'acqua calda, sulla distribuzione del calore e sui sistemi di raffrescamento, consente risparmi considerevoli; basti pensare, per gli edifici residenziali, alla sostituzione della caldaia e delle sorgenti luminose con apparecchi di ultima generazione.

Gli interventi impiantistici, dunque, possono accrescere anche sensibilmente l'efficienza energetica della costruzione, sfruttando quanto già realizzato in occasione di interventi passati o gli effetti che il recupero renderebbe comunque necessari per garantire, con sistemi meno efficienti, condizioni igieniche e di benessere accettabili. In molti casi, anche un intervento impiantistico apparentemente più invasivo è favorito dalla contemporanea attuazione di miglioramenti strutturali; ne è un esempio il consolidamento dei solai di piano, occasione per l'inserimento di sistemi di riscaldamento radiante a pavimento, pratica non a caso già diffusa e consolidata nel recupero del costruito storico. L'impiego delle fonti rinnovabili, in particolare della tecnologia fotovoltaica e di quella solare termica, è invece oggetto di ampi dibattiti in quanto altera l'aspetto dell'edificio e il paesaggio ma può anche incidere sulla conservazione dei manti di copertura originari. Infatti, accanto all'impiego di soluzioni di minor impatto, come i sistemi a energia geotermica, la produzione di energia rinnovabile a scala di quartiere, l'impiego di quella prodotta in aree urbane di minor interesse culturale e paesaggistico, è spesso ritenuto preferibile mantenere l'uso delle fonti energetiche classiche per garantire l'integrità formale e materica dell'architettura storica.

Rispetto ai componenti edilizi il dibattito sulla necessità del miglioramento energetico riguarda soprattutto gli interventi che coinvolgono l'involucro. Molte delle tecnologie disponibili per il recupero del costruito esistente non sono ammissibili nell'architettura storica, perché incompatibili con il suo comportamento igrometrico oppure perché il loro impatto formale e materiale sulla fabbrica li rende inconciliabili con i principi della conservazione. Nonostante tali difficoltà, che riguardano soprattutto l'architettura antica, è opportuno indagare le possibilità di un miglioramento prestazionale dell'involucro. L'edificio, infatti, nei limiti delle sue caratteristiche morfologiche, distributive, termofisiche, deve contribuire ad assicurare una sufficiente qualità ambientale dei suoi spazi interni.

L'adattamento delle costruzioni storiche alle condizioni climatiche locali, che è proprio delle pratiche edilizie del passato, fa sì che questo obiettivo possa essere conseguito, almeno in parte, sfruttando o ripristinando accorgimenti già presenti nell'architettura storica, ad esempio per assicurare la ventilazione naturale degli ambienti. In molti casi, come in quello degli infissi, la manutenzione degli elementi tecnici consente di conseguire prestazioni non paragonabili a quelle raggiunte dai sistemi più avanzati resi disponibili dalla ricerca e dalle innovazioni produttive, ma in grado di accrescere la qualità termica e ambientale degli spazi interni e di garantire al contempo la conservazione degli elementi originari della costruzione e, dunque, del suo valore culturale. Infine, come per gli impianti, anche per l'involucro alcuni interventi, che hanno un effetto più consistente sull'efficienza energetica della costruzione, possono trovare applicazione in occasione degli interventi di recupero, soprattutto quando lo stato di degrado della costruzione renda necessari estesi interventi di consolidamento, sostituzione, integrazione. Non a caso interventi già piuttosto diffusi nella riqualificazione del costruito storico sono quelli d'isolamento delle coperture, quasi sempre oggetto di rifacimento. Comunque, per la maggior parte delle soluzioni oggi disponibili, e che di seguito si descrivono, l'applicabilità all'architettura storica resta limitata.

Soprattutto i problemi di compatibilità geometrica con la costruzione storica, con le sue soluzioni formali e decorative, spinge verso l'applicazione di sistemi innovativi d'intervento sull'involucro, che mirano a conseguire elevate prestazioni senza incidere visivamente sull'aspetto della fabbrica (è il caso ad esempio di pitture riflettenti, isolanti a base di aerogel o materiali a cambiamenti di fase). La loro recente introduzione tuttavia non rassicura del tutto sugli effetti che possono avere sulla salute delle persone e sull'ambiente né sulla loro interazione di lungo periodo con i materiali della costruzione storica.

5.1 Il miglioramento prestazionale delle murature

Allo spessore elevato delle murature storiche¹ si attribuisce un contributo positivo nel determinare le prestazioni energetiche dell'edificio, soprattutto per la loro inerzia termica, che, dovuta allo spessore del componente e alla notevole massa dei materiali che lo costituiscono, bilancia una resistenza spesso lontana dai limiti molto restrittivi prescritti dalle norme vigenti. Quest'inerzia, però, non è una costante del costruito storico, soprattutto

alle ultime elevazioni degli edifici, dove ragioni statiche hanno richiesto sezioni murarie esigue, paragonabili a quelle dei tamponamenti nelle costruzioni moderne in calcestruzzo armato. Gli scambi igrometrici con l'ambiente esterno, inoltre, possono incidere negativamente sulle condizioni di benessere negli spazi interni, soprattutto nel caso di murature di scarsa qualità costruttiva o in cattivo stato di conservazione.

Gli interventi di consolidamento strutturale e di risanamento dei problemi igrometrici sono spesso sufficienti a garantire adeguate condizioni igieniche all'interno degli edifici, in quanto migliorano la tenuta all'aria e riducono i rischi di condensazione e proliferazione di muffa. Anzi, quelli contro l'umidità sono considerati a tutti gli effetti interventi di miglioramento energetico e ambientale (Troj e Bastian, 2014), poiché ridurre il contenuto di acqua capillare nelle murature ne aumenta sensibilmente la resistenza termica. In questi termini, proprio perché consolidati nelle pratiche del recupero, tali interventi non sono oggetto della presente trattazione.

La manutenzione e il restauro degli edifici storici possono pertanto essere l'occasione per migliorare in modo più consistente le prestazioni termiche degli edifici (Boarin e Davoli in Lucchi e Pracchi, 2014). A tal fine, gli interventi sulle murature sono volti principalmente a ridurre la trasmittanza termica attraverso l'applicazione di materiali isolanti, oppure a regolare gli apporti termici solari. Questi ultimi possono essere conseguiti attraverso l'impiego di pitture riflettenti. Per le murature, tuttavia, tale impiego non è consolidato nella letteratura, che talvolta lo propone in combinazione agli interventi sulle coperture, ai quali dunque si rimanda (cfr. par. 5.2.2).

5.1.1 L'isolamento delle murature

In condizioni stazionarie, stabiliti il materiale e lo spessore, uno strato d'isolamento termico produce lo stesso effetto (in termini di resistenza termica) indipendentemente dalla posizione nella stratigrafia del componente; di fatto, però, questa è rilevante perché le condizioni effettive sono dinamiche e variano in modo consistente durante il giorno, soprattutto d'estate. Com'è noto, lo strato d'isolamento termico può essere disposto sulla superficie interna della parete, su quella esterna o in intercapedine². Quest'ultima modalità, applicabile su alcune tipologie murarie storiche, diffuse in particolare nell'Europa settentrionale, è oggetto di ricerche che propongono il riempimento dell'intercapedine con materiale isolante ad alte prestazioni, in particolare aerogel, ed elevata permeabilità al vapore (Pockelé, Gandini, Bernardi e Rodriguez-Maribona, 2014). Tuttavia la tradizione costruttiva italiana, e in essa quella palermitana, si connotano per l'impiego delle murature piene, per le quali le possibilità d'isolamento si limitano all'applicazione sui paramenti.

L'isolamento esterno ostacola gli apporti solari, riducendo così l'efficienza invernale delle chiusure in favore di quella estiva; al contempo, però, non altera la capacità della muratura di accumulare calore. Al contrario una muratura isolata dall'interno sostanzialmente annulla l'effetto della massa, ma soprattutto in estate beneficia delle possibili-

tà di raffrescamento per ventilazione, naturale e meccanica, e consente una rapida climatizzazione degli ambienti; ciò può risultare particolarmente utile per edifici o ambienti utilizzati occasionalmente, soprattutto se di grandi dimensioni, come in molta parte dell'architettura monumentale.

Con l'isolamento esterno la parete tende a raggiungere condizioni di equilibrio termico con l'ambiente interno; il contrario avviene nel caso di isolamento interno, in cui la temperatura superficiale interna della muratura è più bassa e maggiore è il rischio di condensazione durante il periodo invernale. D'altro canto, permane in entrambi i casi il problema dei ponti termici, la cui mitigazione richiede una notevole cura esecutiva, che può accrescere in modo anche inaccettabile il rapporto fra il costo dell'intervento e i benefici energetici che se ne ricavano (Pickles, Brocklebank e Wood, 2010e). Mentre però con l'isolamento esterno i ponti termici corrispondono principalmente alla linea di gronda e al perimetro degli infissi, il problema è più acuto con l'isolamento interno, che non consente di creare uno strato continuo d'isolamento; ciò si verifica, in particolare, in corrispondenza delle connessioni fra gli orizzontamenti e le chiusure verticali, ma anche fra le murature esterne e quelle trasversali interne (cfr. par 5.4).

In generale, dunque, l'isolamento dall'esterno risulta più efficiente dal punto di vista energetico, ma la soluzione più adatta dipende dalle caratteristiche della costruzione e dalle esigenze connesse al suo utilizzo; frequentemente infatti si suggeriscono l'isolamento esterno per gli edifici residenziali, quello interno per gli spazi d'uso occasionale o temporaneo. L'applicazione di uno strato isolante sulle murature storiche è spesso inaccettabile per i problemi formali, tecnici e conservativi che pone. Esso presuppone la rimozione dello strato di finitura esistente (Boriani et al., 2011) o il suo ricoprimento e determina quindi modificazioni non reversibili. Il recupero degli intonaci storici, invece, oltre a essere una pratica più affine ai criteri della sostenibilità ambientale (in termini di consumo di materiali) contribuisce a conservare il valore dell'edificio come documento di cultura costruttiva. A tal proposito, lo studio sui materiali d'isolamento per le murature storiche descritto da Kilian e Krus (2014) indaga anche la reversibilità dei sistemi applicati e le loro conseguenze sulla finitura del paramento murario cui aderiscono.

L'isolamento del paramento esterno può interferire visibilmente con gli aggetti degli elementi decorativi e con le dimensioni dei vani d'apertura, aspetti che interessano non solo l'architettura monumentale ma anche quella minore, nella quale in genere i semplici apparati decorativi si concentrano sul prospetto esterno e i vincoli di tutela, quando presenti per lo più per ragioni paesaggistiche, riguardano essenzialmente i prospetti. Inoltre l'isolamento esterno altera l'allineamento con gli edifici adiacenti, comporta l'adattamento del sistema di smaltimento delle acque meteoriche e richiede un intervento unitario su tutta la fronte architettonica, obiettivo non sempre facilmente conseguibile negli edifici costituiti da molte unità immobiliari.

Questi aspetti, legati principalmente all'esito formale dell'intervento, inducono gran parte delle fonti a ritenere generalmente preferibile l'applicazione interna dell'isolamento,

nonostante la perdita dell'inerzia termica delle murature, i maggiori rischi di condensazione e formazione di ponti termici, i problemi tecnici legati all'interferenza con elementi decorativi quali i controsoffitti voltati, le cornici dei serramenti, gli arredi fissi, i *lambris* e altri ornamenti parietali, ma pone problemi anche nella realizzazione o nel mantenimento delle canalizzazioni idriche ed elettriche esistenti.

L'isolamento termico delle murature attraverso applicazioni ai paramenti può essere svolto con il sistema "a cappotto", cioè impiegando pannelli, oppure con un intonaco termoisolante. Il primo sistema, caratterizzato da spessori più consistenti, dà una maggiore resistenza termica alla chiusura, ma è in genere meno praticabile rispetto all'applicazione dell'intonaco, soprattutto per la compatibilità geometrica con gli apparati decorativi e le soluzioni spaziali esistenti. Inoltre l'isolamento, soprattutto in area mediterranea, deve mirare a soddisfare non solo le esigenze invernali ma anche quelle estive. Ciò implica che la scelta del materiale e della soluzione più opportuni non deve fondarsi solo sulla capacità dello strato isolante di frenare il flusso di calore, cioè sul comportamento in regime statico³, ma anche sul comportamento inerziale della chiusura isolata.

A parità di comportamento inerziale, però, uno strato che isola bene d'inverno isola bene anche d'estate (Galbusera et al., 2010) e in ciò ha un ruolo rilevante la diffusività termica del materiale (cfr. par. 3.1). In generale, la progettazione dell'isolamento termico si basa sulle esigenze estive nel caso in cui la struttura da isolare sia leggera, se pesante è sufficiente tener conto di quelle invernali perché le estive risultano soddisfatte.

In un edificio storico, una minore conducibilità termica del materiale isolante consente di ridurre lo spessore a parità d'isolamento e, quindi, di limitare i problemi di compatibilità geometrica. Al contempo, la scelta del materiale isolante dipende strettamente dalla sua permeabilità all'aria e al vapore in quanto deve consentire all'umidità, comunque presente nelle murature, di evaporare senza provocare danni e manifestazioni di degrado; deve quindi essere permeabile al vapore, così da non modificare il profilo igrometrico dei materiali tradizionali. Caratteristiche di traspirabilità simili tra la parete e l'isolante, infatti, riducono i rischi igrometrici di germinazioni biologiche, oltre a consentire alla parete di mantenere un ruolo di regolazione dell'umidità relativa degli ambienti interni.

5.1.2 Sistemi "a cappotto" per l'edilizia storica

I materiali disponibili per l'isolamento termico delle chiusure verticali sono numerosi (Jelle, 2011) ma la loro scelta per l'applicazione alle murature storiche, nei limitati casi in cui sia possibile, è fortemente indirizzata dalle caratteristiche igrometriche di queste, che richiedono isolanti con bassa resistenza al vapore e quindi caratterizzati da porosità aperta. Di conseguenza, come sottolineano Boriani, Giambruno e Garzulino (2011) nell'analizzare i miglioramenti prestazionali, la compatibilità e la durabilità di diversi materiali isolanti utili alla realizzazione di sistemi "a cappotto"⁴ interni ed esterni per gli edifici storici, si escludono materiali come il polistirene estruso (XPS) o il poliuretano espanso (PUR), nonostante la loro bassa conducibilità termica. Di contro, anche fra i pannelli in materiali isolanti di origine

vegetale, spesso consigliati per il loro comportamento igrometrico, soprattutto per applicazioni interne, alcuni non sono ritenuti idonei all'impiego negli edifici storici a causa del sensibile decadimento di resistenza termica per elevati contenuti di umidità; ne sono esempi i pannelli in cellulosa e quelli in fibra di canapa (Boriani et al., 2011).

Infatti, è ritenuta buona pratica che le murature siano progressivamente più permeabili verso il paramento esterno. Al contempo alcuni autori (Lucchi e Pracchi, 2013) suggeriscono di impiegare alla base delle fronti architettoniche esterne materiali isolanti impermeabili, quali appunto il polistirene estruso o il poliuretano espanso, per evitare un abbassamento di resistenza meccanica a causa della risalita di umidità e quindi la formazione di un ponte termico; suggeriscono invece per la muratura soprastante materiali traspirabili, quali i pannelli di sughero espanso o quelli in fibra di legno. Ovviamente anche le finiture, necessarie a proteggere lo strato isolante dalla pioggia e da danni meccanici, devono essere permeabili per permettere alla muratura di smaltire l'acqua che per varie cause essa assorbe; a tal fine è opportuno adoperare finiture a base di calce (Lucchi e Pracchi, 2013).



Figura 5.1. L'isolamento delle chiusure verticali è un intervento che incontra notevoli difficoltà d'applicazione, in quanto difficilmente compatibile con la conservazione dei caratteri materici e formali dell'edificio storico. L'esempio di figura, riportato da Ambrogio e Zuppiroli (2013) mostra l'alterazione dei vani di finestra e delle decorazioni del cornicione provocate dall'applicazione di un rivestimento a pannelli su un edificio storico. Da Ambrogio e Zuppiroli (2013).

Qualora l'isolamento sia applicato al paramento interno, il rischio di condensazione, che deriva dalla riduzione della temperatura superficiale della parete ma anche della sua attitudine all'asciugamento, non può essere mitigato con materiali che ritardino o impediscano il passaggio del vapore. La soluzione più adatta all'architettura storica consiste nell'impiego

di materiali isolanti permeabili a funzionamento capillare, che, oltre a essere igroscopici, grazie alle caratteristiche di capillarità favoriscono una distribuzione rapida ed estesa dell'umidità al proprio interno e accelerano in tal modo l'asciugamento della muratura, anche a beneficio dell'effetto isolante. La condensazione, infatti, può verificarsi comunque in corrispondenza delle connessioni con altri componenti edilizi ma anche in presenza di discontinuità, ad esempio nei punti in cui lo strato isolante è attraversato dalle canalizzazioni degli impianti. Per consentirne quindi il funzionamento capillare, ma anche per evitare che l'aria umida si accumuli e condensi dietro lo strato coibente, questo deve aderire bene al supporto murario. Perciò è necessario applicare una malta di livellamento a base di calce idraulica naturale, per la quale in Troi e Bastian (2014) si indicano un'elevata porosità (>50%), una resistenza alla diffusione di vapore molto bassa (inferiore a 1), una sufficiente attività capillare ($A_w > 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0.5} \cdot \text{kg}$) e una resistenza media a compressione di $3 \div 4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.

I vantaggi e i limiti di vari sistemi d'isolamento interno permeabili al vapore e ad azione capillare sono descritti in Troi e Bastian (2014); si analizzano fra gli altri pannelli in schiuma di poliuretano ($\lambda=0,031 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), in schiuma minerale ($\lambda=0,042 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), a base di perlite espansa naturalmente ($\lambda=0,045 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), in silicato di calcio ($\lambda=0,06 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Mentre il primo determina una maggiore resistenza termica ma ha una resistenza al vapore sensibilmente più alta rispetto agli altri, il quarto compensa la maggiore conducibilità termica, praticamente doppia rispetto alla schiuma di poliuretano, con un'efficacia molto più significativa nel trasporto dell'umidità. I pannelli in schiuma minerale e quelli a base di perlite espansa naturalmente, invece, sono simili sia per conducibilità termica sia per permeabilità al vapore, ma il primo ha maggiore attitudine all'accumulo del vapore, l'altro a trasportarlo. Anche pannelli a base di argilla, sughero, lana di legno, nei quali si verifica movimento d'acqua per capillarità, bilanciano una maggiore conducibilità termica con altri vantaggi tecnici. Infatti non richiedono il livellamento delle irregolarità del supporto murario, necessario per gli altri sistemi prima citati, e sono versatili rispetto a interventi successivi, in quanto consentono l'affissione di elementi impiantistici e di arredo.

Se da un lato il vincolo principale all'impiego dei sistemi d'isolamento "a cappotto" negli edifici storici discende dalla conservazione dei rivestimenti originari e dalla scarsa reversibilità dell'intervento, dall'altro i problemi di compatibilità geometrica possono essere contenuti attraverso l'impiego di materiali isolanti di recente introduzione che, caratterizzati da una conducibilità termica molto bassa, consentono di ridurre sensibilmente lo spessore dello strato. Fra questi spiccano i pannelli in aerogel, caratterizzati da una struttura porosa nanometrica che, essendo in parte aperta, permette anche la traspirazione del vapore. Caratterizzati da una conducibilità termica di $0,013 \div 0,014 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (Kalnæs e Jelle, 2015), gli aerogel consentono di conseguire un elevato isolamento termico con spessori molto contenuti e sono particolarmente adatti alla mitigazione dei ponti termici. In questo caso, tuttavia, sono generalmente applicati in forma d'intonaco (cfr. par. 5.1.3) (Boriani et al., 2011 e Lucchi e Pracchi, 2013).

Infine, un utilizzo che potrebbe essere adatto alle murature storiche è quello di pannelli isolanti che sfruttano materiali a cambiamento di fase (PCM, *Phase Change Materials*), i quali, spesso composti da paraffine, sfruttano il calore latente connesso ai passaggi di stato: quando la temperatura supera una certa soglia, dipendente dal materiale, questo passa allo stato liquido assorbendo calore dall'ambiente esterno; di contro, durante il raffreddamento e quindi la solidificazione, il calore prima immagazzinato viene rilasciato. In tal modo, i materiali a cambiamento di fase scambiano con l'ambiente quantità anche significative di calore mantenendo stabile la temperatura; dunque, sono particolarmente utili per aumentare non solo la resistenza termica delle chiusure ma anche le loro caratteristiche dinamiche di sfasamento. Da questo punto di vista sono adatti a isolare sia strutture leggere, quali le murature sottili, sia strutture pesanti, per fornire alle prime e mantenere nelle seconde un'elevata inerzia termica.

5.1.3 Intonaci termoisolanti

Gli intonaci termoisolanti consentono di conseguire un isolamento termico inferiore rispetto ai sistemi a pannelli di più elevate prestazioni, senza peraltro evitare la formazione di ponti termici e i rischi di condensa che affliggono le altre forme d'isolamento, soprattutto quando applicate sul paramento murario interno (Reichel, Hochberg e Köpke, 2007). Sebbene alcuni autori (Boriani et al., 2011) li ritengano relativamente costosi rispetto all'efficienza conseguibile, tuttavia per molti aspetti essi sono più adatti a un impiego nell'architettura storica rispetto ai sistemi "a cappotto". Gli intonaci termoisolanti, infatti, hanno una lavorabilità molto simile a quelli tradizionali (Bianco et al., 2014) e possono essere impiegati su superfici irregolari, fuori squadra, curve. Inoltre hanno un coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo ($\mu=10\div35$) che li rende adatti all'impiego su murature caratterizzate da umidità di risalita capillare.

Gli intonaci termoisolanti, che sono commercializzati in forma di premiscelati secchi a base di cemento o di calce idraulica naturale, solo nel secondo caso sono compatibili con le murature storiche e ne consentono la traspirazione. Il materiale coibente è costituito da aggregati leggeri (Barbero, Dutto, Ferrua e Pereno, 2014), che possono essere sintetici o naturali. Fra i primi si annoverano materiali organici e inorganici, quali perle di polistirene e vetro espanso, anche in forma di fibre. Tra i secondi si impiegano ad esempio il sughero e la pomice. Gli intonaci a base di materiali isolanti sintetici hanno buone caratteristiche di resistenza termica e traspirabilità al vapore ma non favoriscono l'inerzia della parete, cioè buone prestazioni in termini di sfasamento e attenuazione del calore, garantite invece dall'elevata capacità termica di molti isolanti naturali (Lucchi e Pracchi, 2013).

Nella configurazione dell'intonaco con uno strato di fondo termoisolante e una finitura di protezione, indicazioni sugli spessori sono rintracciabili in alcune norme tecniche, come quelle tedesche, che prescrivono uno spessore fra 20 e 100 mm per la base e fra 8 e 15 mm per la finitura (Reichel et al., 2007).

Rispetto a un intonaco tradizionale, la cui conducibilità termica secondo le norme tecniche è compresa fra $0,7$ e $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, negli intonaci termoisolanti la conducibilità può essere anche inferiore a $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Barbero et al. (2014) identificano le caratteristiche più utili al confronto prestazionale fra gli intonaci: la massa volumica in polvere, la massa volumica secca della malta indurita e la conducibilità termica. Gli autori evidenziano in particolare la correlazione fra le ultime due caratteristiche; la conducibilità si riduce infatti al diminuire della densità della malta indurita, caratteristica questa non sempre riportata dai produttori nelle schede di prodotto. Inoltre individuano il principale percorso d'innovazione per gli intonaci termoisolanti nella riduzione della massa volumica della malta indurita, che, attualmente compresa fra 250 e $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ per prodotti ad alte prestazioni, potrebbe auspicabilmente essere ridotta al di sotto di $250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

La ricerca sugli intonaci termoisolanti si concentra anche sull'impiego di prodotti "innovativi", quali i materiali a cambiamento di fase, che determinano un'elevata resistenza termica (Boriani et al., 2011) e al contempo consentono all'intonaco di accumulare e cedere calore, contribuendo maggiormente alla regolazione delle condizioni termiche degli ambienti interni. A parità d'isolamento termico, essi consentono di ridurre sensibilmente lo spessore del rivestimento (Barbero et al., 2014). Interessante anche per gli intonaci è l'impiego degli aerogel, la cui produzione in Europa, tuttora piuttosto limitata soprattutto in ragione dei costi elevati, consente comunque di raggiungere una massa volumica della malta indurita di $220 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e una conducibilità termica di $0,028 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. L'elevata porosità dell'aerogel, spesso superiore al 90% grazie ai pori nanometrici che lo caratterizzano, si accompagna anche a un'elevata permeabilità al vapore, che ne rende l'impiego compatibile con le costruzioni storiche⁵.

5.2 Interventi sugli orizzontamenti

Nel recupero degli edifici storici gli interventi sugli orizzontamenti sono piuttosto frequenti, volti al consolidamento strutturale della costruzione e al suo aggiornamento impiantistico. Per conseguire tali fini sono diversi gli interventi praticabili, a seconda del valore artistico o documentale dell'elemento tecnico, del suo stato di conservazione, della possibilità d'intervenire all'intradosso o all'estradosso. La consistenza di queste misure, però, rende spesso possibile sfruttare l'occasione per migliorare le prestazioni energetiche e acustiche degli orizzontamenti. Non a caso, gli interventi di tal genere sono già piuttosto frequenti nelle pratiche del recupero edilizio.

Se da un lato il contatto diretto con il terreno tende a stabilizzare le condizioni termiche degli ambienti che con esso sono in contatto, dall'altro l'umidità relativa spesso troppo elevata spinge alla sostituzione delle chiusure contro terra, in genere compatibile con i principi della conservazione per l'assenza di pavimentazioni di pregio, spesso già sostituite in passato o usurate. Molto diffusa nelle pratiche del recupero è quindi la realizzazione di intercapedini areate o di vespai in materiali leggeri isolanti, quali l'argilla espansa, che consentono di risolvere il problema dell'umidità, ma al contempo, se adeguatamente

dimensionati, possono conseguire i requisiti di trasmittanza termica previsti dalla normativa nazionale sull'efficienza energetica per le chiusure orizzontali.

Allo stesso modo, è frequente negli interventi sui solai di piano il ricorso a massetti alleggeriti, che accrescono l'isolamento termico e acustico di queste chiusure, utile soprattutto quando esse separano unità immobiliari distinte⁶. La stessa applicazione dei pavimenti radianti in genere si associa a uno strato d'isolamento termico, per limitare le dispersioni verso gli spazi sottostanti.

Gli interventi sugli orizzontamenti che hanno il maggior rilievo sono soprattutto quelli sulle coperture. Queste costituiscono una porzione spesso consistente dell'involucro edilizio, la più esposta agli agenti atmosferici, alla radiazione solare e agli scambi radiativi notturni con l'atmosfera. Il suo ruolo protettivo, cui si associa spesso una manutenzione insufficiente, rende necessarie frequenti revisioni, sostituzioni parziali o estesi rifacimenti. Anche per esse, non a caso, è abbastanza consolidata l'applicazione di materiali isolanti sotto tegola, secondo sistemi molto diffusi nell'edilizia corrente.

I locali sotto tetto sono soggetti a forti escursioni termiche giornaliere e stagionali, che determinano condizioni interne lontane da quelle di benessere sia durante l'inverno che d'estate, anche a causa di spessori murari di solito esigui. Le dimensioni di questi ambienti in molti casi rendono possibile ricavarvi unità immobiliari. Questa pratica, molto diffusa in passato ma anche oggi, di solito non si accompagna a un'adeguata progettazione del benessere termico, soprattutto dal punto di vista dinamico, e comporta quindi un notevole dispendio energetico sia d'inverno sia d'estate. D'altro canto, in parecchi edifici, per lo più monumentali, gli spazi sottotetto sono inutilizzati o adibiti a funzioni che non necessitano di un impianto di climatizzazione. Queste diverse condizioni influenzano notevolmente le possibili strategie di miglioramento energetico: nel primo caso l'isolamento delle coperture è pressoché inevitabile; nel secondo lo spazio sotto tetto, se gli scambi ventilativi con l'esterno sono adeguatamente controllati, contribuisce invece a stabilizzare le condizioni termiche degli ambienti sottostanti⁷.

Alle strategie d'isolamento possono aggiungersi anche interventi volti a regolare gli scambi di calore per radiazione, in particolare a ridurre gli apporti solari per mezzo di rivestimenti riflettenti. Al contempo, proprio l'esposizione delle coperture all'irraggiamento del sole, insieme alla loro inclinazione sull'orizzonte, ne fanno la parte dell'involucro più adatta allo sfruttamento dell'energia rinnovabile attraverso le tecnologie del solare termico e del fotovoltaico (cfr. par. 5.5), la cui applicazione pone tuttavia rilevanti questioni in merito alla compatibilità materica e formale con gli edifici storici.

5.2.1 Isolanti termici in copertura

L'isolamento termico della copertura dipende innanzitutto dalle sue caratteristiche materiche e costruttive. Analogamente alle murature, per una struttura pesante, qual è ad esempio un solaio a orditura metallica con campi in voltine di laterizi, la progettazione dell'isolamento è basata essenzialmente sulle esigenze invernali: soddisfatti gli obiettivi di

trasmissione termica in regime stazionario, sono accettabili anche le prestazioni estive. Per un orizzontamento leggero come quelli lignei, che costituiscono la gran parte delle coperture piane e inclinate anche nella tradizione costruttiva palermitana, la progettazione deve essere rivolta principalmente alle prestazioni estive (Galbusera et al., 2010).

Com'è noto, l'isolamento delle coperture può essere realizzato con il sistema "a tetto freddo", cioè disponendo lo strato coibente all'intradosso della struttura di copertura; oppure "a tetto caldo", quando esso è inserito al di sotto dello strato di tenuta all'acqua; o ancora con il sistema "a tetto rovescio", nel quale l'isolante si trova al di sopra della membrana impermeabile⁸. Ciascuna soluzione accosta ai vantaggi anche problemi tecnici. Nel primo caso, infatti, la quota esterna delle coperture resta invariata ma si riduce l'altezza utile interna, spesso modesta negli ambienti sottotetto; inoltre l'isolamento interno risulta inapplicabile qualora si debba preservare l'aspetto originario del soffitto. Negli altri due casi, invece, è necessario modificare la quota di copertura; questa condizione è in genere accettabile nel caso palermitano, in cui la presenza pressoché costante del muro d'attico ne mitigherebbe l'impatto visivo; peraltro per l'architettura di base le norme comunali consentono la revisione delle coperture e concedono negli interventi di ristrutturazione, ai fini del consolidamento statico, la possibilità d'innalzare la quota di copertura sino a 50 cm.

Tuttavia la soluzione "a tetto caldo" è in genere meno durevole di quella "a tetto rovescio" in quanto lo strato di tenuta all'acqua, posto immediatamente al di sopra di quello coibente, può degradarsi rapidamente per via delle sollecitazioni termiche cui è soggetto (De Santoli, 2014). Per le coperture inclinate, inoltre, l'ombreggiamento dell'isolante da parte del manto di copertura si accompagna alla microventilazione sotto coppo; il raffrescamento che ne consegue riduce il carico termico estivo e tale effetto può essere accresciuto sensibilmente con la realizzazione di un'intercapedine ventilata fra manto e strato isolante, qualora la quota esterna di copertura possa essere innalzata.

Anche per le coperture sono molti i materiali isolanti potenzialmente impiegabili. Come sottolineano Boriani et al. (2011), a parità di materiale e per isolamento esterno i sistemi che impiegano pannelli rigidi riducono sensibilmente la trasmissione termica della copertura rispetto ai feltri, mentre un ulteriore, leggero miglioramento si consegue abbinando ai pannelli un'intercapedine ventilata.

Quando l'isolamento è disposto fra i travetti di un controsoffitto, o fra le travi di un solaio, è opportuno adoperare materiali isolanti morbidi, in particolare in forma di feltro. Ciò consente non solo l'adattamento a forme curve, ma anche un più facile riempimento degli spazi irregolari delimitati dalla struttura lignea, nei quali sarebbe più complesso realizzare una buona tenuta con pannelli rigidi. Questi, invece, sono opportuni per la realizzazione di controsoffitti interni (principalmente tavole in fibra di legno rivestite con intonaco di calce traspirante), per l'isolamento delle superfici inclinate, nelle quali altri materiali sarebbero soggetti a un fenomeno di sedimentazione, e sono necessari su quelle calpestabili (Pickles et al., 2010 c). Per la loro irreversibilità e per l'impossibilità di ripararle qualora sia necessario intervenire su di esse (ad esempio in occasione di una riparazione della

copertura), la letteratura sconsiglia l'impiego di schiume isolanti applicate a spruzzo all'intradosso (Pickles et al., 2010 c).

Anche per le coperture degli edifici storici, come per le pareti, è suggerito l'impiego di isolanti "naturali" (Pickles et al., 2010 b-d). Per quelli flessibili, in particolare, si consigliano materiali quali la lana di pecora e le fibre di canapa, che sono igroscopici, mantengono buone proprietà isolanti in un ampio intervallo di contenuti di umidità e non comportano i rischi per la salute che potrebbero essere connessi ad altri materiali in fibra, quali quelle minerali. Proprio per le caratteristiche di igroscopicità e il buon comportamento termico in caso di umidità, agli isolanti "naturali" (che comprendono anche fibre di lino, di mais, di kenaf, di juta, il sughero) viene attribuita una durabilità sensibilmente maggiore rispetto a isolanti più diffusi (EPS, XPS, PUR, lane minerali) o a elevate prestazioni (pannelli multistrato termoriflettenti, PCM, isolanti sottovuoto) (Boriani et al., 2011). Anche per le coperture, tuttavia, è sconsigliato il ricorso ai prodotti in fibra di cellulosa, per il decadimento delle loro proprietà coibenti in presenza di umidità. Peraltro alcuni autori attribuiscono agli isolanti "naturali" una scarsa resistenza all'attacco da insetti.

Fra i pannelli rigidi, quelli in fibra di legno sono ritenuti i più idonei, per la loro permeabilità al vapore, le buone capacità isolanti e una massa superficiale non trascurabile, che contribuisce a ridurre il rischio di surriscaldamento estivo. In genere essi consentono anche un buon controllo della tenuta all'aria, in particolare attraverso un'adeguata conformazione dei giunti fra i pannelli.

Il mantenimento delle proprietà coibenti anche in presenza di umidità consente l'installazione di questi isolanti senza il ricorso alle barriere al vapore, che alcune istruzioni di buona pratica (Pickles et al., 2010b-d) sconsigliano per le difficoltà di realizzazione di uno strato continuo di tenuta. Concordemente con Boriani et al. (2011), queste fonti consigliano l'impiego di barriere traspiranti permeabili al vapore, che sono sufficientemente porose da consentire l'equilibrio igrometrico ma al contempo riducono il passaggio di vapore in misura sufficiente a migliorare le prestazioni dello strato isolante, soprattutto se di bassa densità. L'impiego di barriere impermeabili, invece, è ritenuto necessario negli ambienti caratterizzati da picchi intermittenti di umidità relativa, tipicamente i servizi igienici e le cucine (Pickles et al., 2010b-d). Del resto, la traspirabilità della struttura lignea suggerisce l'impiego di membrane impermeabili all'acqua ma permeabili al vapore (valori comuni di S_d per le membrane traspiranti sono compresi fra 0,03 m e 0,1 m), che però non vengono comunemente impiegate nelle coperture piane in quanto la pressione idrostatica dell'acqua potrebbe consentirne la permeazione.

5.2.2 Coperture riflettenti

Gli scambi di calore che si verificano per irraggiamento fra i componenti opachi dell'involucro e l'ambiente esterno possono essere modificati agendo sulle loro caratteristiche superficiali, ovvero sulla riflessione luminosa e sull'emissività termica. Questi interventi possono avere effetti rilevanti sulle prestazioni delle coperture, che, soprattutto in

tessuti densi come quelli dei centri storici, sono la parte dell'involucro maggiormente soggetta all'irraggiamento solare. Oltre agli apporti termici legati a quest'ultimo, le coperture sono interessate anche dal raffreddamento notturno, dovuto all'irradiazione di calore verso la volta celeste (ovvero l'"extraflusso termico" di cui tratta la UNI/TS 11300-1:2014). La limitazione di quest'ultimo, attraverso una bassa emissione nella banda dell'infrarosso, contribuisce a ridurre il fabbisogno di riscaldamento nel periodo invernale e può essere conseguita adoperando pannelli isolanti riflettenti (cfr. par. 5.2.1) oppure rivestimenti basso-emissivi sul manto di copertura.

Tuttavia, gli interventi sulle proprietà superficiali del manto di copertura sono volti principalmente a ridurre l'assorbimento di energia solare, cioè a limitare i rischi di surriscaldamento in aree a clima caldo e temperato, soprattutto per ambienti sotto tetto. Tali interventi consentono anche di ridurre il fenomeno dell'isola di calore, con benefici sia a livello ambientale, sia per la stessa costruzione, che avrebbe così un minor fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva grazie alla riduzione della temperatura esterna. A tal fine si adoperano materiali e pitture "freddi", caratterizzati cioè da valori elevati sia di riflessione luminosa sia di emissività termica. Il primo, infatti, riduce l'assorbimento della radiazione solare incidente, mentre il secondo favorisce lo smaltimento della radiazione assorbita nella banda dell'infrarosso.

L'applicazione di pitture riflettenti ai manti di copertura degli edifici storici, che hanno valori di riflessione piuttosto bassi (fra 0,30 e 0,40), richiama la pratica tradizionale palermitana del rivestimento dei coppi con latte di calce, ma pone un problema cromatico. Per conseguire la massima riflessione, infatti, è necessario ricorrere a colori chiari, facilmente applicabili alle pavimentazioni esterne delle coperture piane (peraltro spesso costituite da mattoni maiolicati nel caso di Palermo) ma non accettabili su quelle inclinate. Sono state proposte, quindi, pitture che aumentano la riflessione degli elementi del manto solo nel campo dell'infrarosso, mantenendo invece nel visibile la riflessione solare propria dei colori diversi dal bianco. In tal modo la pittura determina una colorazione comunemente poco riflettente, qual è quella delle tegole di laterizio; al contempo si innalza anche sensibilmente la riflessione nel campo dell'infrarosso, in cui si concentra circa metà del calore irraggiato dal sole, a prezzo di una riduzione della riflettanza totale (SRI) rispetto ai rivestimenti riflettenti a più alte prestazioni.

Per i rivestimenti riflettenti è molto comune l'impiego di vernici, prevalentemente acriliche, a base di biossido di titanio, Ti_2O (Muscio, Libbra, Siligardi e Tartarini, 2011). Questi, tuttavia, sono caratterizzati in genere da un rapido decadimento prestazionale a causa dell'esposizione agli agenti atmosferici e all'inquinamento dell'aria. Pertanto alcune ricerche si sono concentrate sulla realizzazione di pitture riflettenti a base di materiali minerali, soprattutto a base di materiali ceramici nanometrici, che compensano il maggior costo rispetto al Ti_2O con una durabilità sensibilmente maggiore, legata a un'elevata resistenza alla deposizione dello sporco (Muscio et al., 2011).

Le pitture riflettenti sono in grado di mitigare in misura consistente il surriscaldamento degli ambienti sotto tetto. Questi possono essere interventi utili nei casi in cui non sia possibile applicare uno strato isolante, ad esempio per l'impossibilità di modificare la quota delle coperture o di nascondere questo strato funzionale (potrebbe essere ad esempio il caso di coperture nelle quali le tegole del manto poggino su listelli distanziati e siano quindi visibili dall'interno, qualora si preveda il mantenimento di questa soluzione). Tuttavia, la riduzione degli apporti solari, se è benefico in estate, determina un aumento del fabbisogno di energia per il riscaldamento.

Pisello e Cotana (2014) hanno indagato l'impiego di tegole riflettenti compatibili con i manti di copertura tradizionali su un edificio del centro storico di Perugia, nel quale prevale il fabbisogno per il riscaldamento. Lo studio, per mezzo di simulazioni, confronta una tegola non trattata (con emissività pari a 0,88 e riflettanza solare di 0,45), con tre rivestite con una pittura riflettente (nelle quali l'emissività è sempre 0,88 mentre la riflettanza solare è 0,67 in un caso, 0,58 negli altri due, con diverse componenti nelle bande dello spettro). Mostra in particolare che l'impiego delle seconde consente di ridurre il consumo estivo sino al 51% a prezzo di un incremento invernale molto contenuto, di circa il 2%, in quanto la sensibile riduzione delle ore estive in cui la temperatura esterna supera i 26°C è bilanciata da una variazione molto limitata di quelle in cui la temperatura interna degli ambienti sotto tetto scende sotto 20°C.

Marino, Minichiello e Bahnfleth (2014) hanno indagato invece l'applicazione di pitture riflettenti sulle coperture di un edificio tipo, supposto in condizioni climatiche molto differenti, e ne hanno analizzato sia le conseguenze in termini di prestazioni energetiche del fabbricato, sia di tempi di rientro economico dell'intervento. Lo studio mostra che, facendo riferimento al fabbisogno annuale di energia, l'applicazione di pitture riflettenti sia particolarmente opportuna in condizioni climatiche calde (Palermo e Siviglia), meno vantaggiosa per casi come Roma, leggermente svantaggiosa nelle condizioni climatiche delle altre città esaminate (Milano, Parigi, Berlino, Londra, Stoccolma). Gli autori mostrano che gli svantaggi invernali, legati al maggior assorbimento di radiazione solare, possono essere limitati mediante l'applicazione di un intonaco a bassa emissività (0,62), ottenuto mescolando a un intonaco tradizionale delle nanosfere ceramiche.

Il ricorso a pitture riflettenti, infatti, può essere praticato anche per le superfici verticali, come del resto promosso dai sistemi di certificazione LEED. Anche in questo caso sono disponibili in commercio pitture che intervengono sulla riflessione nell'infrarosso, mentre mantengono sostanzialmente invariata la banda del visibile, per cui si riesce a raggiungere un indice TSR (*Total Solar Reflectance*) superiore al 30% anche con colori molto scuri, per i quali l'indice è comunemente prossimo a zero. Peraltro, l'impiego di nanomateriali a base ceramica consente anche di realizzare trattamenti superficiali permeabili al vapore.

Nel caso delle pareti verticali, comunque, il ricorso a colori chiari è piuttosto diffuso, soprattutto nelle aree a clima temperato e caldo, e non è infrequente, specie sulle pareti cieche esposte alla pioggia, l'impiego storico di rivestimenti maiolicati. Peraltro, soprattutto nei

centri storici, il consistente ombreggiamento delle fronti architettoniche dovuto alla prossimità degli edifici limitrofi limita sensibilmente il possibile campo di applicazione delle pitture riflettenti ai paramenti murari, per i quali le ricerche si concentrano invece prevalentemente sull'impiego di nanotecnologie, e in particolare del Ti_2O , per accrescere le prestazioni meccaniche di consolidanti innovativi e conferire ad essi funzione autopulente.

5.3 Miglioramento prestazionale degli infissi

La sostituzione dei serramenti lignei esistenti è una pratica molto diffusa nel recupero degli edifici, sospinta da consistenti detrazioni fiscali e dalle migliori prestazioni termiche e acustiche degli infissi di nuova produzione. Questa tendenza, oggi piuttosto discussa per gli edifici di recente costruzione, lo è a maggior ragione per quelli storici, nei quali è ritenuta spesso ingiustificata (Torsello e Musso, 2003). In molti casi la sostituzione dei serramenti è resa necessaria dal degrado in cui versano; in tanti altri, però, la loro riparazione, oltre a soddisfare gli obiettivi della conservazione, porterebbe a prestazioni termoacustiche accettabili e sarebbe certamente più sostenibile rispetto alla produzione di nuovi componenti e allo smaltimento di quelli rimossi (Lucchi e Pracchi, 2013).

Le prestazioni degli infissi esistenti possono essere migliorate agendo sui vetri, sui telai e sulle connessioni con le pareti. Un vetro singolo, che ha una trasmittanza termica molto elevata rispetto a quella del telaio, incide negativamente sulla prestazione complessiva del serramento. Un basso valore di trasmittanza termica, come il limite di $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ introdotto dal D.P.R. 59 del 2009 per la zona climatica B, può essere conseguito impiegando un vetrocamera 4-16-4 mm con intercapedine d'aria e senza trattamenti superficiali. Ciò richiede la rimozione dei vetri esistenti e dell'eventuale intelaiatura secondaria; adattato l'alloggiamento al nuovo vetro (con dimensioni leggermente maggiori), questo viene fissato con stucco o silicone e si ricolloca l'eventuale telaio secondario rimosso (Torsello e Musso, 2003). L'inserimento di un unico vetrocamera al quale sovrapporre i divisori con semplice funzione estetica, anziché di tante lastre quante quelle preesistenti, consente di ridurre i ponti termici di bordo, che incidono soprattutto sui vetri doppi, in misura anche maggiore rispetto a quelli tripli (Troi e Bastian, 2014).

Gli infissi storici palermitani, tuttavia, sono caratterizzati da uno spessore contenuto, compreso in genere fra 5,5 e 6 cm per i telai mobili (Culotta, La Franca e Scianna, 1998) e ciò non sempre consente l'alloggiamento di un vetrocamera di notevole spessore, mentre la riduzione della sezione degli elementi di bloccaggio intermedi può essere ostacolata dalle loro dimensioni e dalle modanature che li decorano (fig. 5.2). Sebbene alcuni (Troi e Bastian, 2014) prospettino la possibilità di inspessire il telaio dividendolo in due parti e interponendo uno strato intermedio per ridurre la trasmittanza, questa soluzione, oltre che costosa, appare tecnicamente troppo complessa, soprattutto per i danni che provocherebbe alle connessioni del telaio; tali difficoltà, che renderebbero questo intervento economicamente sconsigliato nel caso di infissi ordinari, in quelli di pregio indurrebbero per precauzione a tentare altre vie.

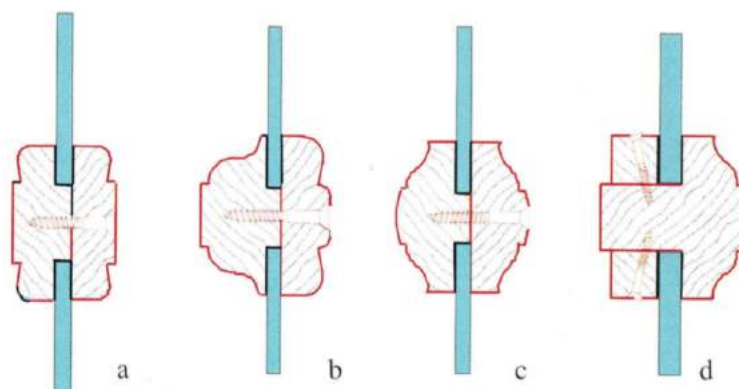


Figura 5.2. Alcune modalità di bloccaggio dei vetri adoperate nei serramenti storici palermitani. Le modanature possono ostacolare la sostituzione del vetro singolo con uno doppio. Da Culotta et al. (1998).

Quando è possibile una certa traslazione del fermavetro, il problema può essere risolto impiegando elementi vetrati caratterizzati dall'utilizzo di gas nobili in intercapedine ed eventualmente di rivestimenti selettivi. Ad esempio, sempre secondo la UNI/TS 11300-1, una trasmittanza U_g di $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ può ottenersi, senza rivestimenti bassoemissivi, con un vetrocamera 4-12-4 riempito di gas Argon, 4-8-4 con gas Krypton, 4-6-4 con gas Xenon ($2,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$). Di contro aumenta il costo del serramento e, nel tempo, la fuoriuscita del gas ne riduce le prestazioni (Heath, Baker e Menzies, 2010). Se invece una lastra vetrata è trattata su una superficie così da avere un'emissività normale non superiore a 0,20, è sufficiente un vetrocamera 4-6-4 con intercapedine d'aria. Altre soluzioni bilanciano uno spessore contenuto dell'elemento vetrato con minori prestazioni termiche: è il caso dei vetri a camera proposti da *Historic Scotland* o dei vetri sottili indicati da Troi e Bastian (2014), nei quali le operazioni di tempra consentono di ridurre lo spessore delle lastre vetrate.

La sostituzione dei vetri tradizionali con quelli a camera è ritenuta da alcuni troppo invasiva sull'aspetto dell'infisso e quindi decisamente sconsigliata (Torsello e Musso, 2003). L'alterazione è rilevante soprattutto nei serramenti di esiguo spessore, che anzi in alcuni casi impediscono l'inserimento del vetrocamera. Del resto, i casi in cui siano tuttora presenti vetri di manifattura storica, che come è noto hanno un aspetto sensibilmente diverso dagli attuali vetri *float*, spingono alla definizione di soluzioni particolari. Ad esempio, come riporta Mastrodicasa (2009), in un recente intervento al Palazzo Vecchio di Firenze si è giudicata necessaria la sostituzione degli infissi vetrati retrostanti le bifore su piazza della Signoria. Per mantenere, di questi serramenti, le vetrate storiche con tessuto ottocentesco a filo di piombo, i nuovi infissi sono stati realizzati con telai in multistrato di rovere lamellare di spessore sufficiente ad alloggiare due nuove lastre (delle quali quella esterna riflette il 39% della radiazione solare), fra le quali interporre quella storica, separata da entrambe per mezzo di sottili intercapedini riempite con gas Argon.

Un miglioramento diffusamente suggerito dalla letteratura consiste nell'apposizione di un secondo pannello vetrato (a vetri singoli o a camera), vincolato al telaio esistente o mon-

tato su un secondo serramento. La realizzazione di un doppio infisso è alla base del sistema proposto dal progetto europeo 3ENCULT, costituito da un infisso in legno di aspetto analogo ai serramenti tradizionali, ma nel quale prestazioni termiche molto elevate sono assicurate dalla scelta di vetri ad alte prestazioni e dall'inserimento dello strato aggiuntivo costituito da una seconda anta. Questo tipo di applicazioni, che richiamano alcune tradizioni costruttive locali, è volto principalmente a contenere le perdite di calore durante l'inverno. Non a caso viene evidenziato (Troi e Bastian, 2014) che i benefici connessi a questa soluzione si riducono al diminuire della richiesta di riscaldamento e si suggerisce per le aree a clima mediterraneo l'impiego di vetri selettivi a singola camera.

Una soluzione certamente meno invasiva è costituita da lastre in polycarbonato che, secondo sistemi brevettati, possono essere fissate all'infisso esistente con sostegni lignei e un sistema magnetico, che ne consente anche la rimozione (per la pulizia o quando non necessari). Il sistema, ancora non perfezionato nel sistema di fissaggio, consente un discreto incremento della resistenza termica del vetro (Historic Scotland, 2012c). Un altro miglioramento alternativo alla sostituzione dei vetri consiste nell'applicare alle lastre rivestimenti a pellicola, che ne modifichino le caratteristiche di emissività e riflessione solare e la trasmittanza termica (De Carli, Villi, De Giuli e Peretti, 2014)⁹.

Alcune fonti attribuiscono all'elevata trasmittanza del vetro singolo un ruolo secondario nel determinare le scarse prestazioni dei serramenti storici e piuttosto ne ritengono accettabile il mantenimento. Riferendosi al clima britannico, nel quale l'esigenza di riscaldamento è prevalente, Pickles et al. (2012a) sostengono che alla trasmissione attraverso il vetro sia dovuto meno di un quarto delle perdite di calore attraverso le finestre tradizionali, mentre il resto sarebbe causato dalle infiltrazioni d'aria, dovute al degrado degli infissi e delle connessioni alla struttura muraria nonché alle deformazioni che nel tempo interessano inevitabilmente i telai lignei.

L'incremento della tenuta all'aria dei serramenti è un intervento poco intrusivo e al contempo economicamente efficace. Alcune fonti sottolineano che un'eccessiva riduzione della ventilazione naturale, dovuta a prestazioni elevate degli infissi, possa influire negativamente sulla qualità dell'ambiente interno. Tuttavia, una maggiore tenuta all'aria è in genere necessaria per rendere accettabili le prestazioni dei serramenti. Data l'attività igrometrica delle costruzioni storiche, viene consigliato (Pickles et al., 2012a) un numero di ricambi compreso fra $0,4 \text{ h}^{-1}$ e $0,8 \text{ h}^{-1}$, da conseguire per lo più attraverso fonti controllabili che possano essere chiuse all'occorrenza. In genere negli edifici storici i valori sono invece ben al di sopra di $0,8 \text{ h}^{-1}$.

All'incremento della tenuta all'aria contribuisce, innanzitutto, il mantenimento in efficienza di cerniere, cardini e meccanismi di chiusura. L'ermeticità dell'infisso può essere compromessa anche da scheggiature degli spigoli e da fenomeni di marcescenza; in tal caso è necessario sostituire la parte degradata, costituita frequentemente dai traversi inferiori di porte esterne e finestre, soggetti all'azione della pioggia e al ristagno d'acqua in corrispondenza del davanzale o della soglia (Torsello e Musso, 2003). Quando le battute degli infissi

hanno un gioco eccessivo, è opportuno inserire apposite strisce in gomma che riducano il passaggio d'aria, oppure, per un miglioramento più durevole, impiegare "sottili lamine d'acciaio piegate e inchiodate al battente che, in chiusura, sono forzate contro la battuta del telaio fisso" (Torsello e Musso, 2003). Le indicazioni degli enti di tutela britannici, invece, riguardano essenzialmente l'impiego di guarnizioni polimeriche (fig. 5.3).

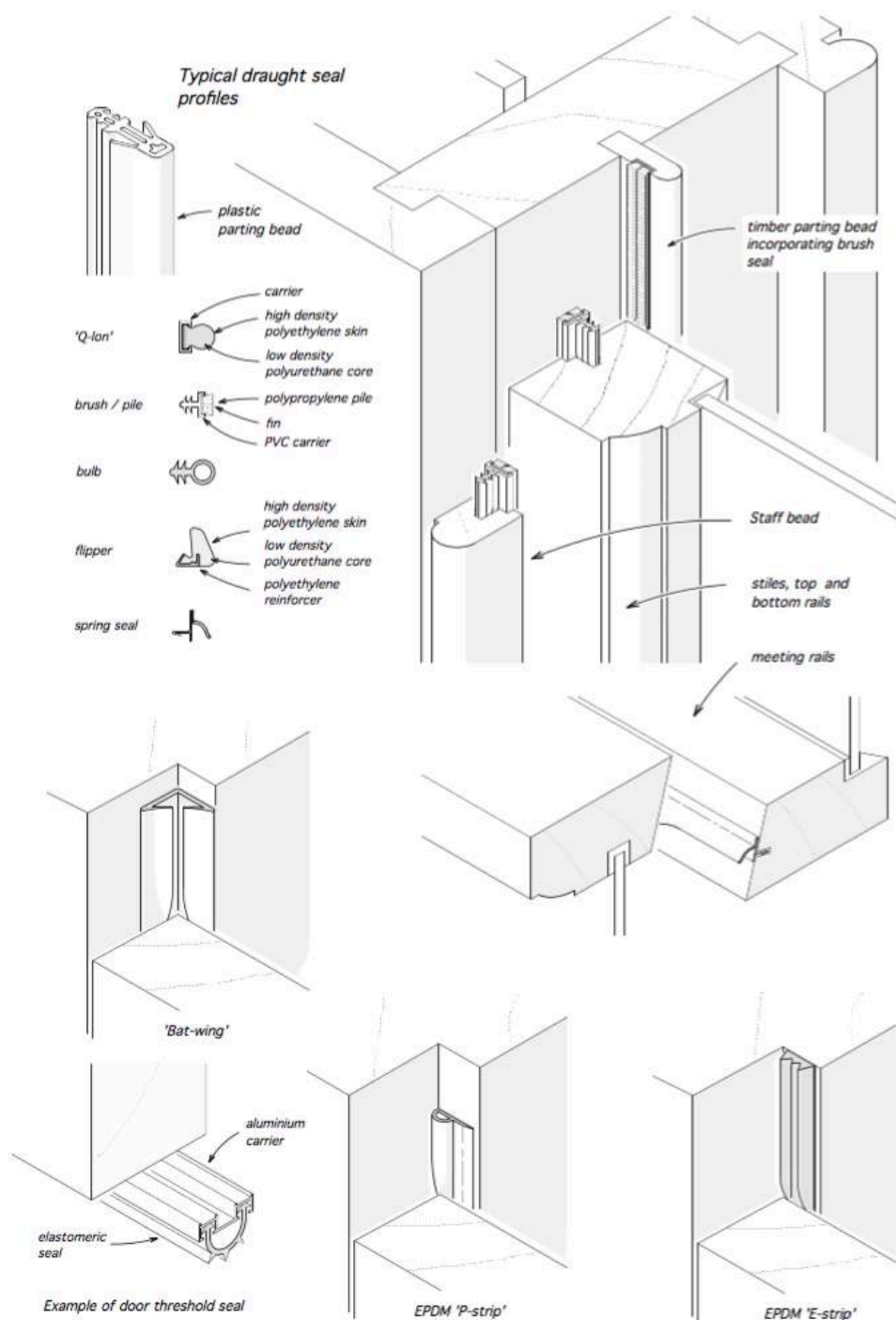


Figura 5.3. Guarnizioni per infissi con ante saliscendi (*in alto*) e con ante a battente (*in basso*). Da Pickles et al. (2015).

La scelta delle guarnizioni dipende dalla dimensione dei vuoti da occludere e dalla loro regolarità, dall'opportunità di renderle invisibili all'apertura dell'infisso, dal colore richiesto (in quanto dipingerle può modificarne le caratteristiche), dalla possibilità, in una successiva manutenzione, di rimuoverle e installarle nuovamente (Pickles, McCaig e Wood, 2015). Le guarnizioni cambiano, ovviamente, a seconda che debbano applicarsi a infissi a battente o scorrevoli. Per i primi, che sono i più diffusi in Italia, sono necessarie guarnizioni a compressione. Queste sono disposte in genere lungo tutto il bordo del telaio e sono di semplice ed economica installazione. Inoltre, per il fatto di essere solitamente montate in modo da poggiarsi sul telaio della porta o della finestra, sono poco soggette alle espansioni e contrazioni stagionali degli infissi. Tuttavia sono adatte solo per vuoti stretti e regolari. Le guarnizioni a compressione possono essere strisce di EDPM autoadesive in varie dimensioni, oppure in silicone; per vuoti più consistenti si adoperano guarnizioni a forma di O o V in EDPM o a V in silicone. Possono anche impiegarsi, specialmente per infissi metallici, gel siliconici o gomme polimerizzate. Per gli infissi scorrevoli sono adoperate invece guarnizioni a spazzola, in grado di adattarsi a vuoti di dimensioni variabili e irregolari. Esse talvolta includono uno o più inserti plastici nella parte centrale per migliorare la tenuta. Per ottenere un'elevata ermeticità, le guarnizioni per infissi scorrevoli possono essere realizzate in silicone o avere forma particolare, ad esempio nuovamente a V. Alcune hanno una striscia retrostante da incollare o spillare al telaio, altre richiedono di tagliare uno stretto solco nel legno per allocarne la base.

Infine, a proposito del contributo dei sistemi di ombreggiamento non solo al controllo della radiazione solare ma anche all'accrescimento della resistenza termica del serramento, un ruolo significativo possono avere anche le tende, come ha evidenziato Baker (2010) nell'analizzare i miglioramenti conseguibili su infissi storici attraverso l'impiego di doppi pannelli vetrati, scuretti, rivestimenti bassoemissivi su superfici interne ed esterne del vetro, tendaggi interni.

5.4 Le connessioni: ponti termici e permeabilità all'aria

In corrispondenza delle connessioni fra i componenti dell'involucro, in particolare delle murature con gli infissi e gli orizzontamenti, si concentrano ponti termici e infiltrazioni d'aria. I rischi di degrado legati a questi punti di debolezza dell'involucro aumentano quando si accrescono le prestazioni dei singoli elementi tecnici e la loro mitigazione, complessa e costosa (cfr. par. 5.1.1), può precludere l'applicazione di alcune misure di miglioramento dell'involucro.

Nel caso d'isolamento sul paramento interno delle murature, più facilmente praticabile di quello esterno e maggiormente soggetto alla presenza di ponti termici, questi ultimi, quando corrispondenti alle aperture, possono essere risolti risvoltando l'isolamento sugli stipiti, sul succielo e sul davanzale. Tale operazione è resa più semplice dall'impiego di materiali ad elevata resistenza termica, quali gli aerogel, la cui applicazione con uno spessore molto contenuto limita il restringimento del vano libero di apertura. Alcune interessanti applicazio-

ni (Historic Scotland, 2012) mostrano come sia possibile sfruttare le intercapedini che separano le superfici murarie dai rivestimenti parietali degli stipiti e del soffitto (fig. 5.4). Tale soluzione sarebbe in molti casi applicabile anche nel contesto palermitano, dove soprattutto negli edifici aulici sono spesso presenti imbotti lignee per gli infissi.

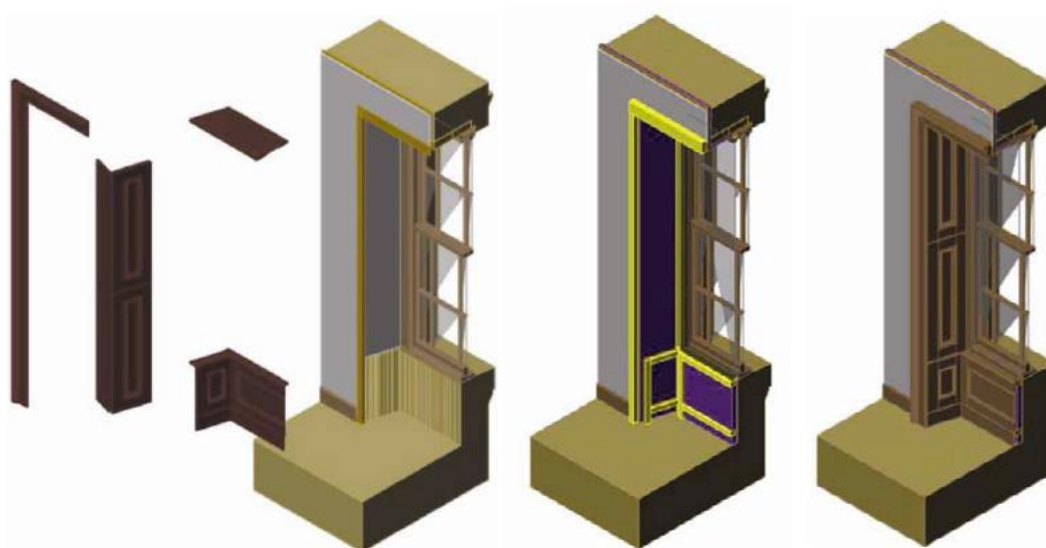


Figura 5.4. Schema delle operazioni per l'isolamento dell'imbotte di un vano di finestra: smontaggio del rivestimento ligneo, applicazione del materiale isolante, rimontaggio del rivestimento. (Historic Scotland, 2012b). © Crown copyright 2012.

Alcune soluzioni per mitigare il trasferimento di calore in corrispondenza della connessione fra le murature e i solai lignei sono illustrate da Bishara e Plagge (in Troi e Bastian, 2014) e comprendono ad esempio il risvolto di uno strato d'intonaco termoisolante sulla superficie dell'orizzontamento all'intradosso o all'estradosso (fig. 5.4). Tuttavia esse non sempre sono applicabili; potrebbero essere impediti, in particolare, dalla presenza di una pavimentazione di pregio o di soffitti decorati. In molti casi invece possono essere facilmente praticate; ad esempio, nei frequenti e spesso profondi interventi sui solai, l'isolamento di parete potrebbe essere congiunto con un massetto a bassa conducibilità termica, quali quelli comunemente realizzati per garantire buone prestazioni acustiche ai solai o per limitare le dispersioni termiche dei sistemi radianti a pavimento verso gli ambienti sottostanti.

Se la tenuta all'aria degli infissi può essere migliorata attraverso l'integrazione di parti mancanti dei telai e la sigillatura dei giunti di connessione con le pareti, molto più complessa è la questione della connessione fra le travi di solaio o copertura e la muratura esterna. All'appoggio delle teste di trave, infatti, il restringimento della sezione muraria costituisce un ponte termico. Al contempo, poiché il rivestimento a intonaco del paramento murario interno costituisce uno strato di tenuta all'aria per l'involucro edilizio storico, la sua interruzione in corrispondenza dello spessore di solaio può favorire il trasporto

di umidità per convezione, che è di due ordini di grandezza maggiore rispetto a quello per diffusione (Peper et al. in Troi e Bastian, 2014).

La tenuta all'aria alla testa delle travi, problema cui già i manuali d'ingegneria sanitaria ottocenteschi si sforzavano di trovare soluzioni efficienti (Vinci, 2003 e 2013), può essere migliorata soltanto quando sia possibile intervenire sugli orizzontamenti, circostanza peraltro piuttosto frequente nel recupero delle costruzioni storiche. A tal proposito Peper et al. (in Troi e Bastian, 2014) hanno analizzato la tenuta all'aria conseguente a diversi sistemi di sigillatura per le fessure da ritiro degli elementi lignei e per la connessione con la muratura, comprendenti nastri adesivi, membrane, rivestimenti a base bituminosa (Peper, Bangert e Bastian, 2014).



Figura 5.5. Soluzioni per il miglioramento della tenuta all'aria delle teste di trave analizzate da Peper et al. (2014). Immagine rielaborata a partire da quella riportata in Peper et al. (2014).

5.5 Miglioramenti impiantistici

¹⁰Numerose innovazioni per il miglioramento prestazionale degli impianti trovano nell'architettura storica le stesse possibilità di applicazione che nelle costruzioni recenti, in quanto non accrescono l'impatto visivo e materiale dei sistemi già installati. Evidente è a tal proposito l'esempio della tecnologia LED per gli impianti d'illuminazione. Questa consente un notevole risparmio energetico, specialmente in ambienti interni con scarsa qualità luminosa come quelli che caratterizzano gli edifici nei centri storici. La tecnologia LED, inoltre, accompagna costi ancora elevati a una notevole durabilità e alla possibilità di ottenere distribuzioni luminose difficilmente realizzabili con le fonti tradizionali¹¹. Peraltro, per favorire la semplice sostituzione del solo elemento illuminante, il rapido sviluppo

di questa tecnologia ne ha accresciuto l'adattabilità ai sistemi esistenti, in particolare agli attacchi diretti già presenti negli apparecchi d'illuminazione degli edifici, talvolta essi stessi oggetto d'interesse culturale (De Santoli, 2014).

Analogamente, per aumentare il rendimento degli impianti di riscaldamento esistenti si può intervenire sul generatore di calore, sul sistema di emissione e su quello di regolazione. Com'è noto, infatti, le caldaie esistenti, risalenti spesso a decine di anni fa, operano a temperature di esercizio elevate (superiori a 70°C) e disperdono una quantità consistente di calore per lo scarso isolamento dei propri componenti e attraverso i fumi di scarico (De Santoli et al., 2014). Con le tecnologie attuali per la produzione del calore, in particolare le caldaie a condensazione, è possibile ridurre sensibilmente tali consumi e quindi aumentare l'efficienza energetica di un edificio storico, nella produzione di acqua calda sanitaria e nella generazione di calore per il sistema di riscaldamento, senza incidere sulla conservazione dei caratteri formali e materici della costruzione.

L'incremento del rendimento di emissione, invece, coinvolge la scelta dei corpi scaldanti. Questa, per assicurare condizioni di efficienza e benessere termico interno, è legata alle caratteristiche geometriche degli ambienti, in particolare alla loro altezza (De Santoli, 2014) ma anche alla frequenza di utilizzo degli spazi. Nell'architettura storica, soprattutto residenziale, anche per la facile integrazione nei frequenti interventi strutturali sugli orizzontamenti sono ormai piuttosto diffusi i sistemi di riscaldamento radiante a pavimento. Questi richiedono una temperatura di mandata molto inferiore a quella dei comuni radiatori; inoltre, riscaldando innanzitutto la zona inferiore degli ambienti, che maggiormente influisce sulla sensazione di benessere, ben si adattano all'altezza degli spazi storici, di solito molto superiore a quella delle costruzioni recenti. Consolidato è anche l'utilizzo integrato del riscaldamento a pavimento e a radiatori, che, con un'unica temperatura di mandata dell'acqua, permette di sfruttare i benefici di entrambi i sistemi, ovvero la più efficiente distribuzione del calore del riscaldamento a pavimento e la maggior versatilità dei radiatori per il riscaldamento intermittente (Dall'Ò, 2003). Per gli impianti di climatizzazione, peraltro, i sistemi di valutazione della sostenibilità (GBC Italia, 2015) promuovono anche la possibilità dell'utente di regolare almeno in parte le condizioni termiche interne.

Numerose ricerche indagano metodi di riscaldamento a parete, che migliorano soluzioni sperimentate già da anni come i sistemi a battiscopa, quelli con pannelli radianti, quelli con tubazioni a parete (a incasso o a battiscopa) (Dall'Ò, 2003). La varietà delle possibili soluzioni è ben illustrata da una ricerca condotta in Germania presso l'*European Competence Centre for the Energy-saving Renovation of Old Buildings and the Preservation of Monuments* (Benediktbeuern, presso Monaco di Baviera), nel quale quattro ambienti di simili dimensioni sono stati impiegati per esaminare il benessere termico e i risparmi energetici connessi all'impiego di pannelli radianti, di sistemi con tubi a parete (*temperierung*), di pannelli modulari che fungono anche da isolamento termico con materiali porosi naturali (Kilian e Krus, 2014). I molti studi rintracciabili in letteratura si concentrano sui benefici che i

vari sistemi danno alla conservazione degli edifici e dei manufatti, al benessere dei fruitori, al contenimento dei consumi energetici e sulle possibilità di combinare questi effetti.

Ad esempio Bichlmair et al. (2014), attraverso l'analisi di un numero consistente di musei bavaresi, analizzano le varie configurazioni in cui in questi è adoperato il riscaldamento con tubi a parete. Gli autori evidenziano come, a fronte di una sostanziale assenza di risparmi energetici, il sistema consenta di garantire adeguate condizioni climatiche per le opere esposte o per i fruitori ma anche di proteggere le murature dai rischi connessi all'umidità. Sebbene sia le applicazioni a parete sia quelle sotto traccia siano considerate compatibili nella riqualificazione del costruito storico, tuttavia nel secondo caso il taglio continuo della muratura, anche se profondo (in ragione dello spessore del rivestimento) pochi centimetri, determina comunque un indebolimento strutturale, che può risultare pericoloso per strutture suscettibili di sollecitazioni orizzontali, dovute per esempio a eventi sismici. Peraltro il sistema, che oltre alla tubazione alla base della parete può comprendere altre a differenti altezze (ad esempio a 1 m e 2 m dal pavimento), si concentra in una fascia di parete frequentemente decorata (basti pensare ai *lambris*); quindi è soggetto ai consistenti limiti dell'isolamento a parete. Inoltre necessita spesso di interventi a pavimento, in particolare quando si debbano oltrepassare vani di porta.

Sia per i sistemi di riscaldamento a pavimento sia per quelli a parete la letteratura riporta diversi casi applicativi nell'architettura maggiore, soprattutto in ambienti di vaste proporzioni quali le chiese (si citano ad esempio De Carli et al., 2013, Käferhaus et al. in Leissner et al., 2014). Per queste uno degli obiettivi principali delle ricerche consiste nel coniugare la conservazione della fabbrica, delle superfici decorate e degli arredi con un livello accettabile di benessere termico e igrometrico e il contenimento dei consumi energetici. In particolare per le chiese, Camuffo (2007) rileva la sussistenza di tre possibili strategie: l'assenza di riscaldamento¹², un riscaldamento conservativo¹³ e uno volto al benessere termico delle persone. La scelta dipende principalmente dall'umidità relativa e deve garantire la conservazione della fabbrica e delle opere che essa contiene, obiettivo questo non sempre conciliabile con le esigenze dell'utenza.

Nell'ottica di garantire il benessere termico delle persone, è dimostrato (Camuffo, 2011) che nei grandi ambienti, caratterizzati da un uso per lo più intermittente, i sistemi di riscaldamento localizzato sono preferibili a quelli di tipo generale. I secondi, infatti, mirano a garantire condizioni di benessere riscaldando l'ambiente nella sua interezza, per cui solo una frazione limitata dell'energia consumata è effettivamente impiegata per il benessere degli utenti, mentre i materiali storici vengono esposti a condizioni termiche e igrometriche diverse da quelle con le quali sono in equilibrio e possono essere degradati per effetto di queste sollecitazioni. Diversamente i sistemi localizzati, che sono di tipo radiante, adoperano una quantità di energia molto più limitata e la concentrano nello spazio in cui questa può rapidamente contribuire al benessere dei fruitori.

In quest'ottica sono significative diverse applicazioni che, anch'esse nell'ambito di edifici ecclesiastici, sono state condotte in Paesi a fabbisogno prevalente di riscaldamento. Da un

lato gli arredi stessi delle aule sono adoperati per posizionare i corpi scaldanti del sistema localizzato: è il caso dei tappeti o dei banchi per i fedeli. Dall'altro, una cura particolare è posta a punti particolari, come la postazione dell'organista (Bertolin et al., 2013), a quelli in cui maggiore è l'affollamento o nei quali è possibile dare agli utenti una maggior sensazione di benessere, come le zone d'accesso e il transetto. Un esempio in cui le esigenze dei fruitori sono integrate con la conservazione dell'edificio e il risparmio energetico è costituito dalla chiesa di Kilmelford, in Scozia (Historic Scotland, 2015) (figg. 5.6, 5.7). In essa un sistema di pannelli radianti, attivati in occasione delle celebrazioni religiose, è combinato con un climatizzatore a funzionamento giornaliero programmato. Questo, dotato tuttavia di un'unità esterna visibile, mantiene la temperatura dell'aula a 15°C, controlla l'umidità relativa dello spazio interno e consente di attivare il sistema radiante con breve anticipo rispetto all'inizio delle celebrazioni, limitando, come lo studio dimostra, i consumi energetici.



Figura 5.6. Pannelli radianti al livello della cornice nella chiesa di Kilmelford, in Scozia. Da Historic Scotland (2015).

Anche per il raffrescamento estivo, come per il riscaldamento invernale, risparmi energetici consistenti possono derivare dall'applicazione di innovazioni già diffuse nell'edilizia recente. È il caso dei sistemi di "trigenerazione", che producono contestualmente energia elettrica, energia termica per il riscaldamento ed energia frigorifera. Alcune ricerche, invece, si concentrano sulla combinazione tra vari tipi di macchine frigorifere per il raffrescamento

di edifici di grandi dimensioni (Alongi et al., 2014), mentre altre guardano prevalentemente all'impatto visivo dell'impianto. Ambrogio e Zuppiroli (2013), ad esempio, considerano come buona pratica di miglioramento impiantistico degli edifici residenziali la sostituzione dei sistemi di condizionamento più comuni, costituiti da unità interne e da macchine frigorifere esterne, con altre a una sola macchina interna, il cui impatto visivo si limita a due fori per la mandata e lo scarico dell'aria.



Figura 5.7. Pannello radiante all'intradosso del soppalco del coro all'ingresso della chiesa di Kilmelford, in Scozia. Da Historic Scotland (2015).

In un'ottica di risparmio energetico e di qualità ambientale degli spazi confinati, assume un ruolo essenziale nella climatizzazione, e in particolare nel raffrescamento, la ventilazione. L'inserimento di un impianto di ventilazione meccanica, sebbene ritenuto essenziale da alcune fonti (Troi e Bastian, 2014), è tuttavia complesso negli edifici storici, a causa degli spazi tecnici che richiede e del notevole impatto visivo. Varie ricerche, ad esempio, esaminano le possibilità di risparmio energetico connesse a sistemi di ventilazione con recupero di calore (Troi e Bastian, 2014). In alcuni casi, la necessità della ventilazione meccanica nasce dalle condizioni igrometriche scadenti che caratterizzano l'edificio, come spesso avviene in quelli di grandi dimensioni. In altri, invece, sono le esigenze connesse alla destinazione d'uso (soprattutto quella museale), che la costruzione storica non è in grado di garantire in modo continuato, a richiedere la realizzazione di un impianto di ventilazione. Nuovamente, soluzioni compatibili con la fabbrica storica possono essere individuate attraverso l'attenzione ai caratteri specifici della singola costruzione. Nella chiesa svedese di Hangvar, ad esempio, un impianto di ventilazione a funzionamento intermittente è stato celato in un vano tecnico di ac-

cesso al sottotetto e messo in comunicazione con lo spazio dell'aula ecclesiastica attraverso l'apertura praticata in un infisso (figg. 5.8, 5.9) (Klenz Larsen et al., 2013).



Figure 5.8, 5.9. Chiesa di Hangvar sull'isola di Gotland, in Svezia. Il sistema di ventilazione per il controllo dell'umidità degli ambienti interni è collocato nel vano scala che dà accesso allo spazio sotto tetto. All'esterno del giardino della chiesa, alcuni moduli fotovoltaici provvedono alla produzione dell'energia necessaria per il preriscaldamento dell'aria.

Proprio per il particolare comportamento igrometrico della costruzione tradizionale, però, è opportuno che nei limiti del possibile essa sia in grado di garantire condizioni igrometriche accettabili anche in assenza di sistemi di ventilazione meccanica, e che a tale principio si conformino gli interventi di miglioramento energetico dell'involucro, soprattutto quelli relativi alla tenuta all'aria degli infissi. In questa prospettiva assumono un ruolo essenziale la ventilazione naturale e l'eventuale ricorso a sistemi "ibridi", che, cioè, la combinano con quella meccanica. Pertanto, come per gli impianti di climatizzazione e di illuminazione, anche in quest'ambito assumono un ruolo significativo sia il comportamento e le abitudini degli utenti¹⁴ sia le possibilità di gestione efficiente consentite dalla domotica (A.T.T.E.S.S., 2010). Al contempo, però, è necessario riconoscere, individuare e dove necessario ripristinare i caratteri dell'edificio storico che ne favoriscono la ventilazione naturale, come lo sfruttamento di canalizzazioni preesistenti. Il caso più

significativo è quello delle canne fumarie dei camini, spesso chiuse in passato per evitare consistenti infiltrazioni d'aria nel periodo invernale; gli enti di tutela britannici, ad esempio, ne suggeriscono il recupero anche attraverso il ricorso a sistemi semplici ed efficaci, come cuscini gonfiabili che d'inverno sigillano l'apertura, d'estate invece la lasciano libera per favorire la ventilazione ascendente e limitare così il surriscaldamento.

Oltre agli aspetti strettamente impiantistici o correlati ai componenti edilizi, i sistemi di valutazione della sostenibilità pongono notevole attenzione alle possibilità d'impiegare negli edifici storici energia da fonti rinnovabili, ovvero derivata dalla combustione di biomasse, dall'impiego delle tecnologie geotermica, eolica, solare termica e fotovoltaica (De Santoli, 2014). Le questioni legate al loro impiego coinvolgono la conservazione della materia storica e dell'aspetto formale dell'edificio, che ne limita fortemente le possibilità d'impiego. Si intrecciano dunque con gli studi che esaminano, anche in termini sociologici, l'impatto visivo delle tecnologie energetiche rinnovabili sul paesaggio (Jerpåsen e Larsen, 2011 e Fouseki e Cassar, 2014). Non a caso, il protocollo GBC *Historic Building* ammette l'impiego di "energia verde", cioè prodotta in aree diverse dal luogo d'impiego, per via delle consistenti restrizioni che i vincoli di tutela possono porre alla generazione in sito di energia da fonti rinnovabili, soprattutto eolica e solare.

L'energia eolica, pur contemplata da alcune fonti (Troj e Bastian, 2014, e Changeworks, 2009) come potenzialmente compatibile con l'architettura storica, è di fatto inapplicabile in ambito urbano e non ammissibile nei parchi storici o in molti contesti rurali. La ricerca, infatti, è molto più attiva nell'impiego dell'energia solare. I problemi a questa connessi coinvolgono, come accennato, l'integrazione del sistema nell'edificio e dunque il suo impatto formale e materico, ma anche l'efficienza dell'impianto e la sua sostenibilità economica. Sotto quest'ultimo aspetto, criteri progettuali per l'integrazione delle tecnologie di sfruttamento dell'energia solare negli edifici storici sono stati sviluppati nell'ambito del progetto svizzero SuRHIB sia per il sistema solare termico sia per il fotovoltaico.

In diverse applicazioni e proposte progettuali (fig. 5.9; Historic Scotland, 2015) si rintraccia l'impiego di pannelli fotovoltaici disposti, a distanza dall'edificio e da sorgenti d'ombra, secondo l'orientamento e l'inclinazione più convenienti. Questa soluzione, adatta a costruzioni isolate o dotate di uno spazio aperto sufficientemente ampio, non è praticabile nei centri abitati, dove l'efficienza del sistema è molto limitata dalla conformazione delle coperture e dall'ombreggiamento prodotto dagli edifici circostanti, e dove più rilevante è l'impatto visivo sull'edificio e sul paesaggio. In alcuni casi le caratteristiche dell'edificio stesso consentono l'installazione dell'impianto; è il caso della chiesa di *Saint James (Saint James's Church, Piccadilly)* a Londra, nella quale i pannelli fotovoltaici sono nascosti alla vista dalla strada dai parapetti che delimitano la terrazza della navata laterale sulla quale sono disposti¹⁵ (The Prince's Regeneration Trust, 2010) (figg. 5.10, 5.11). Nel caso di Palermo, invece, l'attenzione che gli organi di tutela prescrivono nella tutela dei manti di copertura in coppi limita le possibilità d'impiego dei pannelli fotovoltaici e solari termici alle coperture piane.



Figure 5.10, 5.11. Pannelli fotovoltaici sulla copertura praticabile della chiesa di *Saint James* a Londra. Il sistema di sostegno dei pannelli, grazie a un sistema di zavorre, consente di evitare connessioni meccaniche all'orizzontamento.

Le ricerche si concentrano specialmente sulla tecnologia fotovoltaica per accrescerne l'applicabilità al costruito storico. Al di là delle recenti innovazioni riguardanti le pitture fotovoltaiche, soprattutto per superare i vincoli sui Beni paesaggistici sono stati sviluppati nel corso degli anni numerosi prodotti che integrano le celle fotovoltaiche nei manti di copertura tradizionali. Uno sbocco recente di questo filone di ricerca è costituito da moduli fotovoltaici in forma di coppi che, sfruttando soluzioni brevettate (come composti polimerici), compensano la minor efficienza che ne consegue con un aspetto del tutto simile a quello degli elementi tradizionali del rivestimento (fig. 5.12). In questo caso, tuttavia, la risoluzione del problema formale pone un'altra questione di conservazione. Infatti l'applicazione di queste tegole presuppone in genere la rimozione almeno parziale del manto di copertura originario; dunque, come Lucchi e Pracchi (2013) rilevano, bilanciano il vantaggio estetico con un impatto irreversibile sui componenti originali dell'edificio.



Fig. 5.12. Modulo fotovoltaico realizzato in forma di coppo di laterizio. Da <http://www.dyaqua.it/fotovoltaico-invisibile-dyaqua.php>.

Effetti limitati sulla fabbrica storica e sul suo aspetto hanno invece il ricorso alle biomasse o all'energia geotermica. Il primo, in particolare, incide essenzialmente sulla scelta del generatore di calore (che deve essere, appunto, una caldaia a biomassa). Tuttavia, il suo impiego è limitato, oltre che dalla disponibilità stagionale di alcuni combustibili e dal notevole inquinamento prodotto (che rende tale soluzione sostanzialmente inapplicabile nei centri abitati), anche dal notevole spazio necessario per ospitare l'impianto e immagazzinare il combustibile (The Prince's Regeneration Trust, 2010). Questo problema, rilevante soprattutto per edifici di grandi dimensioni, potrebbe rendere necessario costruire un locale tecnico aggiuntivo; ne è un esempio l'applicazione al castello scozzese di Kincardine (Historic Scotland, 2014), nel quale un generatore a biomassa è stato adoperato nel recupero del sistema impiantistico esistente. Il resoconto scientifico dell'intervento è corredato da un'accurata analisi sulla sostenibilità economica dell'intervento, legata anche alle possibilità di approvvigionamento del combustibile.

Diversamente, nel castello inglese di Howard (The Prince's Regeneration Trust, 2010), i costi connessi all'allargamento del locale per gli impianti hanno indotto a preferire l'impiego di pompe di calore alimentate con energia geotermica. Il loro utilizzo, attestato in costruzioni di grandi (Bazzocchi e Croci, 2014) e modeste dimensioni (The Prince's Regeneration Trust, 2010), è ritenuto economicamente più efficiente nel primo caso oppure in complessi di più edifici, per via della grande quantità di energia che possono produrre (The Prince's Regeneration Trust, 2010). Il fatto che l'impianto di produzione dell'energia sia sotterraneo rende queste pompe di calore adatte, da un punto di vista formale, all'utilizzo per edifici storici o in aree tutelate dal punto di vista paesaggistico. Tuttavia, il loro impiego dipende dalle caratteristiche del suolo, dalla disponibilità di uno spazio esterno sufficientemente ampio per collocare gli scambiatori di calore (quando questi sono sviluppati in superficie) o dalla possibilità di scavare in profondità (quando si adoperano il sistema a pozzo), ma anche dal regime di tutela del suolo e dagli eventuali vincoli archeologici vigenti, come nel caso di Palermo¹⁶.

Si cita, infine, il caso significativo della *Morgan Academy* di Dundee, edificio scozzese nel quale, in occasione del recupero susseguente a un rovinoso incendio, si sono installate sia pompe di calore ad aria sia geotermiche, alimentate da un sistema di pannelli fotovoltaici collocati sulle falde di tetto dell'edificio non visibili dall'esterno (Historic Scotland, 2010). Tale esempio, infatti, evidenzia come anche per l'impiego delle fonti energetiche rinnovabili, come per gli interventi di miglioramento che riguardano l'involucro, le caratteristiche specifiche dell'edificio e le sue condizioni di conservazione condizionino l'applicabilità delle tecnologie disponibili, nonché le possibilità e l'opportunità di una loro combinazione.

Note

¹ Gli interventi di miglioramento energetico delle chiusure verticali sono esaminati facendo riferimento alle strutture in muratura di pietra o laterizi, che sono quelle di maggior interesse per l'architettura storica di Palermo. Si tralasciano invece le chiusure verticali lignee. Nel repertorio costruttivo della città, le opere intelaiate in legno erano impiegate per realizzare strutture leggere, essenzialmente divisori per gli spazi interni.

² Si tralasciano in questa trattazione interventi, come la realizzazione di pareti ventilate, che garantiscono elevate prestazioni ma sono inadatte al recupero conservativo del costruito storico.

³ Nel regime statico la distribuzione della temperatura è lineare lungo lo spessore di ogni strato e il flusso di calore dipende soltanto dalla trasmittanza termica (Galbusera et al., 2010).

⁴ I sistemi "a cappotto" sono noti anche con la sigla ETICS, *Energy Thermal Insulating Component Systems*.

⁵ Alcune ricerche, come HIPIN, indagano nuove formulazioni di aerogel per migliorarne le prestazioni, in particolare quelle meccaniche.

⁶ Per le chiusure d'interpiano la normativa nazionale non prescrive limiti massimi di trasmittanza termica. Questi sussistono invece quando la chiusura orizzontale separa lo spazio riscaldato da uno che non lo sia o dall'ambiente esterno.

⁷ In questo caso infatti la norma UNI EN ISO 6946:2008 consente di considerare lo spazio sotto tetto alla stregua di una resistenza termica aggiuntiva a quella della copertura.

⁸ In alcune fonti (Pickles et al., 2010b-c) i sistemi "a tetto caldo" e "a tetto freddo" si distinguono per il fatto che nel primo, diversamente dal secondo, lo strato coibente isola anche lo spazio sottotetto. Pertanto in un sistema "a tetto caldo" lo strato funzionale d'isolamento può occupare qualsiasi posizione nella struttura di copertura.

⁹ Indicazioni interessanti sono contenute anche nelle "Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. Architettura, centri e nuclei storici ed urbani", presentate a Roma il 28 ottobre 2015 presso il Ministero per i Beni e le Attività Culturali.

¹⁰ L'aggiornamento impiantistico degli edifici storici e molte indicazioni progettuali volte a limitarne i consumi sono oggetto già da tempo di ampie trattazioni. Si citano, a titolo esemplificativo, i volumi del "Trattato del Restauro" (Carbonara, 2001) dedicati agli impianti. Le considerazioni riportate di seguito tracciano sinteticamente alcune delle molte direzioni oggi percorse per migliorare l'efficienza degli edifici storici attraverso gli impianti e mirano a metterne in evidenza gli aspetti più importanti nelle finalità generali dello studio, legate al diverso impatto che possono avere, rispetto alle soluzioni impiantistiche tradizionali, sui componenti tecnici dell'architettura storica e sui suoi caratteri formali.

¹¹ In De Santoli (2014) si sottolinea come la versatilità dei LED sia favorita dalla dimensione in genere ridotta di queste fonti luminose, utile ad esempio per dirigere il flusso luminoso in piccole porzioni dello spazio. Di contro le fonti luminose tradizionali possono risultare preferibili qualora si debba ottenere un flusso omogeneo in tutte le direzioni dello spazio.

¹² Se lo stato di conservazione è buono, ogni scostamento dalle condizioni ordinarie di temperatura e umidità relativa cui l'opera è soggetta (cioè dal "clima storico" definito dalla norma EN 15757:2010) è pericoloso; dunque è preferibile non climatizzare l'ambiente. Si citano a tal proposito le interessanti ricerche svolte presso il castello di Skokloster, in Svezia (Luciani, 2013 e Broström et al. in Leissner et al., 2014). È preferibile non riscaldare anche nei casi di ambienti secchi, nei quali il riscaldamento peggiorerebbe il microclima esistente.

¹³ Il riscaldamento conservativo è un riscaldamento continuo a bassa temperatura, volto a controllare le condizioni igrometriche dell'ambiente. È utile quando l'umidità relativa tende a mantenersi elevata, favorendo la degradazione biologica dei manufatti.

¹⁴ È significativa a tal proposito la guida interattiva al miglioramento energetico compatibile dell'architettura storica (*Responsible Retrofit Guidance Wheel*) elaborata dall'associazione britannica *Sustainable Traditional Buildings Alliance* e consultabile al sito <http://responsible-retrofit.org/wheel/> (cfr. par. 2.4).

¹⁵ I pannelli fotovoltaici sono disposti su sostegni che, grazie a un sistema di zavorre, non necessitano di vincolo meccanico alla pavimentazione della terrazza.

¹⁶ È interessante la proposta di un impiego dell'energia geotermica nel contesto dei Sassi di Matera (Loforese, in corso di pubblicazione).

Bibliografia

Alongi, A., Scoccia, R., Motta, M., & Mazzarella, L. (2014). Numerical investigation of the castle of Zena energy needs and a feasibility study for the implementation of electric and gas driven heat pump - Analisi numerica del fabbisogno energetico del castello di Zena e studio di fattibilità per l'implementazione di pompe

di calore elettriche e a gas. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014.*

ANIT. (2010). *Linee Guida Anit: corretta progettazione con i materiali "isolanti riflettenti". Versione 1.0 - Settembre 2010.* TEP, Milano.

A.T.T.E.S.S. (2010). *La qualità delle prestazioni energetico-ambientali nella manutenzione dell'architettura storica: Linee Guida.* A.T.T.E.S.S. Da http://www.veneto.beniculturali.it/sites/default/files/ATTESS_LINEE_GUIDA.pdf

Baker, P. (2010). *Technical Paper 1: Thermal performance of traditional windows.* Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers>.

Barbero, S., Dutto, M., Ferrua, C. & Pereno, A. (2014). Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings*, 77, 40-47.

Bazzocchi, F., & Croci, L. (2014). On field performances of geothermal heat pumps: the cases of an historical building and an experimental facility - Pompe di calore geotermiche e prestazioni in campo: i casi di un edificio storico ed un impianto sperimentale. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014.*

Bertolin, C., Camuffo, D., & Della Valle, A. (2013) Efficiency of an organ heater and its potential impact on the organ in a church. In A. Troi, & E. Lucchi (a cura di), *Cultural Heritage Preservation EWCHP 2013: Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, 16-18 Settembre 2013* (pp 41-46). Milano: Felix Verlag editrice.

Bianco, L., Serra, V., Fantucci, S., Dutto, M., & Massolino, M. (2014). Thermal insulating plasters as a solution to refurbish historic building envelope: first experimental results - Intonaci termoisolanti come soluzione per il retrofit energetico di edifici storici: primi risultati sperimentali. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014.*

Bichlmair, S., Raffler, S., & Kilian, R. (2014). The Temperierung heating systems as a retrofitting tool for the preventive conservation of historic museums buildings and exhibits - I sistemi di riscaldamento radiante come strumento per una conservazione preventiva di edifici museali storici e dei materiali esposti. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014.*

Boriani, M., Giambruno, M., & Garzulino, A. (2011). *Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio.* ENEA. Da http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/rds-64.pdf.

Camuffo, D. (2007). *Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali.* Milano: Mondadori Electa.

Camuffo, D. (2013). *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation and Restoration of Indoor and Outdoor Monuments* (seconda edizione). Amsterdam: Elsevier Science.

Carbonara, G. (a cura di). (2001). *Trattato di restauro architettonico* (Volumi V-VII). Torino: UTET.

Changeworks. (2009). *Renewable Heritage: A guide to microgeneration in traditional and historic homes.* Changeworks. Da <http://www.changeworks.org.uk/resources/renewable-heritage-a-guide-to-microgeneration-in-traditional-and-historic-homes>.

Culotta, T., La Franca, C., & Scianna, A. (1998). *Gli infissi del centro storico di Palermo: Indagine tipologica.* Palermo: CNR - Istituto per l'Edilizia e il Risparmio Energetico.

Currie, J., Williamson, J. B., Stinson, J., & Jonnard, M. *Technical Paper 23: Thermal assessment of internal shutters and window film applied to traditional single glazed sash and case windows.* Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers>.

Dall'Ò, G. (a cura di). (2003). *Gli impianti nell'architettura e nel restauro.* Torino: UTET.

De Carli, M., Villi, G., De Giuli, V., & Peretti, C. (2014). Field measurements and simulation of energy, lighting and comfort performance of retrofit of windows by means of film coatings - Misure in campo e valutazione energetica di comfort termico e luminoso nel retrofit di elementi vetrati mediante l'uso di pellicole. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014.*

- De Santoli, L. (a cura di). (2014). *Efficienza energetica negli edifici storici*. Milano: Editoriale Delfino.
- Galbusera, G., Panzeri, A., Salani, C., Tuoni, G., Leccese, F., Arengi, A., & Scaramella, I. (2010). *Vol. 5. Prestazioni estive degli edifici*. TEP, Milano.
- GBC (Green Building Council) Italia. (2015). *GBC Historic Building: Sistema di verifica GBC Historic Building® - Versione breve ad uso pubblico e divulgativo - Per il restauro e la riqualificazione degli edifici storici* (edizione 2015). GBC Italia. Da <http://www.gbcsitalia.org/risorse/169?locale=it>.
- Heath, N., e Baker, P. (2013). *Technical paper 20: Slim-profile double-glazing in listed buildings. Re-measuring the thermal performance*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers>.
- Heath, N., Baker, P., & Menzies, G. (2010). *Technical Paper 9: Slim-profile double glazing. Thermal performance and embodied energy*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/technicalpapers>.
- Historic Scotland. (2010). *Managing Change in the Historic Environment: Micro-Renewables*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/microrenewables.pdf>.
- Historic Scotland. (2012a). *Refurbishment Case Study 1- Five Tenement Flats, Edinburgh: Wall & window upgrades*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurbcasestudies>.
- Historic Scotland. (2012b). *Refurbishment Case Study 2- Wells o' Wearie, Edinburgh: Thermal upgrades to walls, roof, floors & glazing*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurbcasestudies>.
- Historic Scotland. (2014). *Refurbishment Case Study 12 - Kincardine Castle – Installation of biomass system*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurbcasestudies>.
- Historic Scotland. (2015). *Refurbishment Case Study 19 - Trial Church Heating: Radiant Panels and Air Source Heat Pump at Kilmelford Church*. Historic Scotland. Da <http://www.historic-scotland.gov.uk/refurbcasestudies>.
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43, 2549-2563.
- Jerpåsen, G. B., & Larsen, K. C. (2011). Visual impact of wind farms on cultural heritage: A Norwegian case study. *Environmental Impact Assessment Review*, 31, 206-215.
- Kalnæs, S. E., Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150-176.
- Kilian, R., & Krus, M. (2014). Training of experts for energy retrofit at the Fraunhofer Centre for the energy-saving renovation of old buildings and the preservation of monuments at Benediktbeuern. In M. López, A. Yáñez, S. Gomes Da Costa, L. Avellà (a cura di). *Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Historic Buildings. Convegno tenuto a Madrid, Spagna, 29-30 settembre 2014* (pp. 528-534). Madrid: Fundación de Casas Históricas y Singulares y Fundación Ars Civilis.
- Klenz Larsen, P., Wessberg, M., & Broström, T. (2013). Adaptive ventilation for occasionally used churches. In A. Troi, & E. Lucchi (a cura di), *Cultural Heritage Preservation EWCHP 2013: Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, 16-18 Settembre 2013* (pp 55-62). Milano: Felix Verlag editrice.
- Leissner, J., Kaiser, U., & Kilian, R. (2014). *Climate for Culture: Built cultural heritage in times of climate change*. Lipsia, Germania: Fraunhofer MOEZ.
- Lofrese, A. G. (in press). Il Restauro dei Sassi di Matera attraverso Nuove Energie. In *Colloqui.AT.e 2015. Convegno tenuto a Bologna, 26-28 novembre 2015*.
- Luciani, A. (2013). *Historical climates and conservation environments: Historical perspectives on climate control strategies within museums and heritage buildings* (Tesi di Dottorato). Politecnico di Milano, Milano, Italia.
- Marino, C., Minichiello, F., & Bahnfleth, W. (2014). The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings. L'influenza delle finiture superficiali sulla richiesta energetica per il riscaldamento ed il raffrescamento di edifici esistenti. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.
- Marsili, G., Dainese, U., Mazzari, M., Nicoletti, R., Esposti, R., & Panzeri, A. (2014). Cool-roof in restoration projects. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 867-877). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

- Mastrodicasa, C. (2009). Palazzo Vecchio: la sostenibilità in alcuni interventi di restauro. In: M. De Vita (a cura di). *Città storica e sostenibilità - Historic cities and sustainability. Atti del convegno. Convegno tenuto a Firenze, 17 marzo 2009* (pp. 211-228). Edizioni Regione Toscana.
- Muscio, A., Libbra, A., Siligardi, C., & Tartarini, P. (2011). *Ricerca di sistema elettrico. Sviluppo di materiali ad elevata riflessione solare per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici durante la stagione estiva*. ENEA. Da http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/rds-146.pdf.
- Peper, S., Bangert, A., & Bastian, Z. (2014). *Integrating wood beams into the airtight layer*. Darmstadt: Passive House Institute. Da http://www.passiv.de/downloads/05_3encult_wood_beams_airtight_final_report.pdf.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010a). *Energy efficiency in historic buildings: Draught proofing windows and doors*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010b). *Energy efficiency in historic buildings: Insulating flat roofs*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010c). *Energy efficiency in historic buildings: Insulating pitched roofs at ceiling level-cold roofs*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010d). *Energy efficiency in historic buildings: Insulating pitched roofs at ceiling level-warm roofs*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2010e). *Energy efficiency in historic buildings: Insulating solid walls*. English Heritage. Da <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/>.
- Pickles, D., McCaig, I., & Wood, C. (2015). *Traditional Windows: Their Care, Repair and Upgrading*. Historic England. Da <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/traditional-windows-care-repair-upgrading/heag039-traditional-windows.pdf/>.
- Pisello, A.L., & Cotana, F. (2014). Thermal-energy performance of high reflective tiles in historic buildings. Prestazioni termo-energetiche di una tegola ad elevata riflettanza per edifici storici. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.
- Pretelli, M., Ugolini, A., & Fabbri, K. (2013). "Historic plants as monuments" preserving, rethinking and re-using historic plants. *Journal of Cultural Heritage*, 14S, S38-S43.
- Pockelé, L., Gandini, A., Bernardi, A., & Rodriguez-Maribona, I. Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability Efficienza Energetica per la sostenibilità dei distretti storici Europei. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.
- Polo López, C.S., & Frontini, F. (2014). Energy efficiency and renewable solar energy integration in heritage historic buildings. *Energy Procedia* 48, 1493-1502.
- Reichel, A., Hochberg, A., & Köpke, C. (2007). *Intonaci stucchi e pitture*. (E. De Angelis, a cura di). Torino: UTET.
- The Prince's Regeneration Trust. (2010). *The Green Guide for Historic Buildings: How to improve the environmental performance of listed and historic buildings*. Regno Unito: TSO.
- Torsello, B. P., & Musso, S. F. (2003). *Tecniche di restauro architettonico* (Volumi I-II). Torino: UTET.
- Troi, A., & Bastian, Z. (a cura di). (2014). *Energy efficiency solutions for historic buildings: A Handbook*. Basilea: Birkhäuser. Da <http://www.3encult.eu/en/newsevents/all/NewsDetails.html?entryid=110916>.
- Vinci, C. (2003). *La sostenibilità in edilizia: Criteri e regole dell'arte per il costruire "sano"* (Tesi di Dottorato). Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia.
- Vinci, C. (2013). *La costruzione sana. Criteri di sostenibilità tra tradizione e innovazione*. Palermo: Fotograf Edizioni.
- Wood, C., Bordass, B., & Baker, P. (2009). *Research into the thermal performance of traditional windows: timber sash windows*. English Heritage. Da <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/thermal-performance-traditional-windows/thermal-performance-traditional-windows.pdf/>.

CAPITOLO 6

Proposta di descrizione dell'architettura storica di Palermo per categorie edilizie

Proposal for a categorisation of the historic architecture of Palermo

ABSTRACT - The optimal and compatible energy improvement of historic architecture depends on the features peculiar to each construction. However, significant information concerning the impact and effectiveness of enhancement measures can be deduced from the analysis of recurring features, concerning materials and construction techniques, inner distribution and urban aggregation. In this perspective a typological approach has been adopted and its application is discussed in this chapter. This kind of methodology characterises several researches about the energy performance analysis of building stocks, focused on a local or national level. These studies usually aim at developing strategies for policy making and financial programs. In this research, the purpose is to assess the possible integration of compatible energy improvement in the current restoration and maintenance of the historic architecture of Palermo.

The building activities on the town historic centre are ruled by the urban plan P.P.E. Centro storico, which employs building typologies. This approach, now extended to all traditional constructions of Palermo, is mainly connected to the historical function of buildings, which was residential, religious, public or military. However, essentially for dwellings, the P.P.E. typologies also imply distinctions regarding dimensions and inner distribution. The analysis carried out in this part of the research moves from the hypothesis that the regulatory, typological description can be related to the building energy performance more in detail. At the same time, a connection with current conservation practices is possible since the plan states, through its typologies, the building elements to be preserved and the activities allowed.

For these purpose, the categorisation method developed by the EU project EFFESUS is applied to a representative part of the historic centre of Palermo, named mandamento Castellammare. The method, specifically created for historic districts, bases its structure mainly on geometric and aggregation features but can include several aspects, such as construction techniques and protection limits. Through its application, this structure has been adapted to the most relevant features peculiar to the historic architecture of Palermo.

The analysis has involved more than five hundred buildings and is based on the geometric data inferable from the existing urban maps, compared to more recent aerial photographs and controlled by means of in situ inspections. Collected through the software Quantum GIS on the georeferenced vectorial map of the historic centre, the data have been processed in Microsoft Office Excel. The analysis has resulted in twelve categories, based on three aspects: the gross volume, to represent the dimensions of building units; the ratio between shared and total ground floor perimeter, to express synthetically the building shape and the aggregation to adjoining constructions; the P.P.E. typology, to indicate protection requirements, whose distinction between renovation and restoration is notably considered. For each category, the average values of ground floor area, gross volume and joint perimeter have been calculated. They address the selection of representative architectures, through which analysing the current performance of buildings and the applicability of improvement techniques.

Il conseguimento degli obiettivi di efficienza energetica nel settore edilizio richiede strategie politiche e finanziarie di lungo periodo, per elaborare le quali bisogna conoscere le prestazioni degli edifici, le cause principali di consumo, la fattibilità tecnica ed economica degli interventi (Ambrogio e Zuppiroli, 2013). Queste informazioni a larga scala non possono derivare dallo studio di singole costruzioni ma solo dall'analisi e dalla modellazione di comparti edilizi di grandi dimensioni. Per l'architettura storica, però, quest'esigenza si scontra con quella di individuare e rispettare le peculiarità di ogni fabbrica, presupposto perché un intervento sia effettivamente utile e compatibile con i principi della conservazione.

Nel patrimonio storico di un contesto locale è possibile rintracciare caratteri edilizi ricorrenti, che ne influenzano le prestazioni energetiche; essi coinvolgono soprattutto le soluzioni costruttive, la distribuzione interna, l'aggregazione con gli edifici limitrofi. Nella modellazione a vasta scala, alcuni studi adottano dunque un approccio "tipologico". Questo, inteso come il riferimento ai caratteri generali e ricorrenti di un comparto edilizio, consente di analizzare nel dettaglio un numero contenuto di edifici rappresentativi e di dedurre conclusioni valide per l'intero campione esaminato. In tal modo, nei limiti concessi da una necessaria generalizzazione, si può ottenere una base di informazioni sulla quale elaborare strategie locali d'incentivazione e piani urbanistici, procedure di verifica della compatibilità degli interventi e strumenti decisionali a supporto della progettazione.

Per l'architettura storica, tuttavia, il criterio tipologico è spesso criticato in favore di un approccio caso per caso, poiché le semplificazioni che necessariamente introduce possono tradursi nella codificazione di risultati e soluzioni generici. Del resto tale rischio è frequentemente prospettato anche a proposito dell'applicazione agli interventi di recupero dei recenti sistemi di valutazione della sostenibilità. Dal punto di vista energetico, in effetti, l'analisi degli elementi edilizi ricorrenti non è sufficiente a indagare le possibilità di miglioramento alla luce della compatibilità con i caratteri dell'architettura storica. Pertanto alcune recenti ricerche integrano gli scopi e i metodi tipici della modellazione energetica dei comparti edilizi con la considerazione dei limiti posti dalla conservazione e dei rischi connessi agli interventi d'incremento prestazionale.

Così condotta, l'analisi dettagliata di pochi edifici rappresentativi, oltre che lo strumento per definire politiche e strategie a scala locale, può essere un utile indirizzo per la progettazione preliminare degli interventi. Infatti, come lo studio delle caratteristiche termiche e igrometriche dei materiali della tradizione locale (cfr. cap. 4), essa può contribuire a definire un quadro di conoscenze generali per il contesto esaminato. Gli edifici rappresentativi potrebbero dunque costituire rispetto al miglioramento energetico dei "modelli progettuali", secondo il significato e gli obiettivi che a questi, a proposito di una più generale riqualificazione del patrimonio cittadino, sono attribuiti dal "Manuale del recupero del centro storico di Palermo" (Giovanetti, 1997). Soprattutto in contesti privi o poveri di esempi di miglioramento energetico, infatti, i risultati conseguiti su queste costruzioni di riferimento sono utili per esplicitare le attività e le operazioni che, declinate secondo le peculiarità di ogni fabbrica, sono necessarie per garantire la compatibilità dell'intervento.

Nel caso palermitano, il ricorso a un approccio tipologico in ambito energetico, cioè il riferimento ai caratteri edilizi ricorrenti che ne influenzano le prestazioni, appare particolarmente interessante per indagare l'integrazione fra gli interventi di miglioramento e le pratiche consolidate del recupero e della manutenzione degli edifici storici. La ragione sta nel fatto che le attività costruttive sul patrimonio architettonico cittadino sono regolate da una normativa urbanistica ed edilizia che adotta per esso una descrizione tipologica. Partendo da una classificazione degli edifici per epoca di costruzione e destinazione d'uso storica, questa struttura tipologica si fonda sull'individuazione di costanti spaziali e distributive e identifica per ogni gruppo di architetture gli elementi ricorrenti da salvaguardare e le modalità d'intervento consentite.

Il legame di queste tipologie con la morfologia, la consistenza e l'organizzazione interna degli edifici, ma anche con le prescrizioni di tutela, suggerisce la possibilità di correlarle con le prestazioni energetiche. Per esplicitare tale connessione, in questa ricerca la struttura tipologica esistente è stata rivisitata applicando il metodo di "categorizzazione" recentemente proposto dal progetto europeo EFFESUS. Volto all'analisi di comparti omogenei di edilizia storica, esso si basa principalmente sulle caratteristiche dimensionali e aggregative degli edifici e sui caratteri che ne definiscono il valore culturale e le prescrizioni di tutela.

Con quest'applicazione e la conseguente descrizione dell'architettura storica di Palermo mediante categorie edilizie, lo studio non mira a codificare soluzioni volte a incrementare le prestazioni energetiche di tale patrimonio. Seguendo gli obiettivi della ricerca, lo strumento che si propone contribuisce invece a definire una base conoscitiva sulla quale innestare la riqualificazione del singolo edificio. Al contempo, in una prospettiva più ampia, questo strumento può essere impiegato per integrare nella normativa urbanistica ed edilizia sul costruito storico palermitano delle linee d'indirizzo per il suo miglioramento energetico.

6.1 La tutela dell'architettura storica palermitana

Il Codice dei Beni culturali e del Paesaggio, Decreto legislativo 42 del 2004, tutela gli edifici riconosciuti come beni culturali o che siano parte di un bene paesaggistico. Mentre "l'esecuzione di opere e lavori di qualunque genere su beni culturali è subordinata ad autorizzazione del soprintendente" (art. 21, co. 4), i detentori di immobili e aree di interesse paesaggistico "non possono distruggerli, né introdurvi modificazioni che rechino pregiudizio ai valori paesaggistici oggetto di protezione" (art. 146, co. 1) e "hanno l'obbligo di presentare alle amministrazioni competenti il progetto degli interventi che intendano intraprendere" (art. 146, co. 2). Nel primo caso, dunque, sono oggetto di controllo tutte le attività edilizie che interessino l'edificio, dalla manutenzione al restauro, mentre nel secondo caso l'attenzione è rivolta agli interventi che incidano sul paesaggio, cioè solo a quelli che modifichino l'aspetto esteriore delle costruzioni.

La tutela dei beni culturali si attua in modo diverso a seconda che gli edifici siano proprietà di privati o di enti pubblici. Per i primi sono necessari l'accertamento e la dichiarazione d'interesse culturale, condotti su iniziativa pubblica. Del patrimonio architettonico di

Palermo sono vincolati molti palazzi e ville nobiliari, mentre l'inclusione di alcune chiese discende dai decreti di vincolo previsti dalla normativa precedente, in particolare dalla legge 1089 del 1939¹. Qualora esistano da più di settant'anni (art. 12), gli edifici appartenenti a enti pubblici o persone giuridiche private senza scopo di lucro, compresi gli enti ecclesiastici, sono soggetti invece a un vincolo automatico (*ope legis*), che decade solo qualora un'apposita verifica riscontri la mancanza dell'interesse storico o artistico. In tal modo il Legislatore ha svincolato la protezione dell'architettura monumentale italiana dalla sola iniziativa delle Soprintendenze.

Questi due meccanismi non toccano le costruzioni minori, parte rilevante del patrimonio architettonico nazionale, tutelate essenzialmente come parte di beni paesaggistici. Fra questi, per il loro notevole interesse pubblico, il Codice annovera "i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale, inclusi i centri ed i nuclei storici" (art. 136). La perimetrazione dei centri storici e la loro identificazione con le zone urbanistiche A, tuttavia, non ha in giurisprudenza un'interpretazione univoca e ciò inficia l'automatismo di questa previsione normativa (Sanapo, 2001 e Videtta, 2012). Peraltro, l'edificato dei centri storici comprende solo una porzione, anche se molto consistente, dell'architettura minore.

In ambito siciliano, l'articolo 55 (comma 7) della Legge regionale 71 del 1978 impone il parere prescrittivo della Soprintendenza per gli interventi da eseguire nei centri storici, qualora questi non siano soggetti a Piani di Recupero né alle prescrizioni esecutive connesse all'individuazione delle zone territoriali omogenee "A". Nel caso di Palermo, il Comune ha approvato nel 1993 un Piano Particolareggiato Esecutivo che interessa integralmente il centro storico, ad eccezione di alcune aree già normate da precedenti Piani di Recupero². Per il resto del territorio comunale vige la variante generale al Piano Regolatore³, la cui approvazione, nel 2002, ha fatto venir meno la vigenza del parere prescrittivo della Soprintendenza connesso al citato articolo della legge 71 del 1978⁴. Il P.R.G. cittadino include nelle zone A le "parti superstiti (Netto Storico) degli antichi insediamenti urbani e rurali, così come riportate nel rilievo O.M.I.R.A. del 1939" (art. 5, co. 1 delle Norme Tecniche di Attuazione). Il Piano distingue tali zone in A1 e A2. Le prime constano di immobili tutelati, individuati in base ai vincoli della legge 1089 del 1939. Le seconde comprendono i tessuti urbani storici e tutte le costruzioni che, anche all'interno di altre zone territoriali omogenee (Z.T.O.), rientrano nel "netto storico". Quest'ultimo è soggetto a una specifica normativa di Piano volta alla sua conservazione, vigente indipendentemente dalla Z.T.O. (ad eccezione della A1)⁵. Restano comunque soggetti al parere della Soprintendenza gli edifici che rientrano in aree con vincolo paesaggistico, quali Monte Pellegrino, il parco della Favorita, parte del territorio di Mondello.

Le norme d'attuazione del Piano Particolareggiato Esecutivo (P.P.E.) del Centro storico⁶ fanno riferimento a unità edilizie, definite come "porzioni di tessuto edilizio - non necessariamente coincidenti con le proprietà e le particelle catastali - che hanno una propria individualità storica esistente o recuperabile al giorno d'oggi" (art. 4, co. 1). Le unità edilizie sono

descritte dal Piano per mezzo di tipologie, intese come sistemi organizzativi e spaziali “con carattere di modularità e/o costanza costruttiva, in grado di formare edifici simili e ripetuti” (art. 20, co. 1). Esse sono basate su costanti spaziali, costruttive e distributive ma anche su variazioni sistematiche delle costanti tipologiche e delle modalità di aggregazione fra le unità edilizie. Le tipologie del P.P.E. distinguono innanzitutto i “tipi edilizi antichi”, cioè l’edificato esistente al 1877 (evidenziato sulle mappe catastali del tempo) dai “tipi edilizi moderni”. I secondi comprendono due tipologie: da un lato l’“edilizia conseguente il P.R.G. Giarrusso (1886) o da esso derivata e variata”, dall’altro l’“edilizia postbellica”, successiva alla seconda guerra mondiale. Molti edifici ricadenti nel primo gruppo sono d’interesse per la presente ricerca, perché realizzati con tecniche costruttive tradizionali.

I “tipi edilizi antichi” comprendono otto tipologie, distinte innanzitutto in base alla destinazione d’uso storica delle costruzioni, di rado corrispondente a quella attuale: gli “edifici speciali religiosi”, cioè quelli destinati a funzioni connesse al culto, comprendono chiese, oratori e cappelle, ma anche conventi, collegi, seminari e palazzi di carattere religioso; gli “edifici speciali civili” sono quelli un tempo destinati a funzioni specializzate non religiose e includono teatri, edifici produttivi e militari, palazzi pubblici. Le altre tipologie descrivono l’architettura residenziale articolandola secondo caratteristiche dimensionali, distributive e morfologiche. Il P.P.E. distingue in particolare “catoi semplici”, “catoi multipli”, “palazzetti”, “palazzetti plurifamiliari”, “palazzi”⁷.

Gli edifici di base dell’architettura storica palermitana sono i “catoi semplici” e i “catoi



Figure 6.1 e 6.2. Edifici descritti dal P.P.E. come “catoi semplici” (a sinistra; le due costruzioni in parte visibili ai margini dell’immagine, connotate da maggior cura formale, sono “palazzetti”) e “palazzetto” (a destra).

multipli". I primi mantengono indipendenti gli originari alloggi moncamera (cioè appunto i "catoi"), o li hanno aggregati nel solo senso della fronte stradale, mentre i secondi sono l'aggregazione storica di più "catoi semplici". I "palazzi" sono invece le residenze delle classi agiate, caratterizzate, pur con proporzioni molto varie, "da un impianto distributivo unifamiliare di grandi dimensioni e da una veste architettonica fortemente riconoscibile". Spesso sono organizzati intorno a un cortile interno accessibile da un androne carrabile.

Caratteristiche intermedie fra l'architettura aulica e quella elencale hanno i "palazzetti", che riproducono in scala minore il modello dei palazzi e hanno come carattere distintivo minimo la presenza di un cortile (anche ristretto o parzialmente coperto) con un androne d'ingresso non necessariamente carrabile. Infine i "palazzetti plurifamiliari", connotati da più corpi scala indipendenti da cielo a terra, con o senza cortile interno, possono derivare, se non da un apposito impianto settecentesco od ottocentesco, dalla trasformazione in epoca storica di edifici già esistenti, cioè dalla divisione di un palazzo unifamiliare o dall'accorpamento di edifici minori "con l'imposizione di una veste architettonica unitaria".

Per ogni tipologia le norme d'attuazione del P.P.E. indicano gli elementi da mantenere e gli interventi consentiti. Per i "catoi semplici", ad esempio, è ammessa la riorganizzazione delle coperture e del vano scala, mentre il mantenimento della posizione di quest'ultimo è prescritta per i "catoi multipli". Per i "palazzetti" si richiede di preservare l'impianto distributivo originario. Più stringenti sono le prescrizioni che interessano le tipologie dell'architettura maggiore, per le quali il Piano prescrive esplicitamente, oltre alla



Figure 6.3 e 6.4. I due edifici, entrambi inclusi nella tipologia dei "palazzi", mostrano grandi differenze morfologiche e dimensionali.

conservazione degli elementi distributivi ricorrenti, la conservazione e il ripristino di tutti gli elementi architettonici d'interesse storico e artistico e il consolidamento senza alterazioni delle parti strutturali. Soprattutto, il P.P.E. stabilisce le modalità d'intervento consentite sugli edifici in base alla tipologia d'appartenenza. Accanto alla manutenzione ordinaria e straordinaria, al ripristino filologico e tipologico, alla demolizione, sono annoverati il restauro e la ristrutturazione. E sono specialmente la possibilità della seconda e l'imposizione del primo a indicare il maggiore o minor grado di tutela cui lo strumento urbanistico assoggetta il costruito del centro storico. Il restauro è prescritto per le tipologie dell'architettura maggiore ("palazzi", "edifici speciali civili" e "religiosi"), mentre per quella di base ("catoi semplici" e "multipli") è ammessa la ristrutturazione. Caso particolare è quello dei "palazzetti", per i quali il piano ammette in linea generale la ristrutturazione, che ritiene necessaria per adattare l'impianto distributivo antico all'uso moderno, ma in molti casi prescrive puntualmente il restauro. Analogamente, entrambe le modalità sono contemplate per l'"edilizia conseguente al piano regolatore Giarrusso" e specificate per ciascun edificio.

L'approccio tipologico del P.P.E. è stato adoperato in seguito nella variante di P.R.G. del 2002, che ha introdotto una normativa apposita per il "netto storico". Anche in questo caso è stata adottata una descrizione per tipologie⁸, nell'ambito della quale l'edilizia residenziale è articolata in gruppi correlati agli aspetti distributivi e insediativi da un lato, alle prescrizioni di tutela dall'altro. Nelle tipologie residenziali del "netto storico", infatti, è chia-



Figura 6.5. Descrizione tipologica dell'architettura esistente al 1939 oltre il perimetro della città murata. Estratto dalla tavola P2b-5011.

ro il legame con le modalità aggregative degli edifici, che molto influenzano l'estensione della superficie disperdente d'involucro. Particolarmente significative, da questo punto di vista, sono le tipologie dell'"edilizia in linea"⁹ e dell'"edilizia rurale e a schiera di borgata"^{10, 11}.

Il rapporto tra superficie disperdente e volume, che grande importanza ha nella normativa nazionale sull'efficienza energetica, dipende anche dalla presenza del cortile (e di ogni area interna a cielo aperto), che il P.P.E. individua come elemento frequente nell'organizzazione dei "palazzi" e costante in quella dei "palazzetti" e che, in forma di pozzo di luce, è caratteristico anche di molti "edifici in linea". Questi spazi aperti, di vaste proporzioni soprattutto nei conventi e di dimensioni minori nei palazzi nobiliari, contribuiscono al contenimento del fabbisogno energetico estivo per ventilazione; in particolare, quando di dimensioni contenute, attraverso l'ombreggiamento delle fronti e la ventilazione ascendente. Povera di spazi aperti è invece l'architettura di base, dove la ventilazione naturale è assicurata essenzialmente dal vano scala nei "catoi semplici", mentre l'apertura su fronti contrapposte assicura la ventilazione passante in diversi "catoi multipli".

Se nei "palazzetti" e negli "edifici in linea" le unità abitative sono organizzate su livelli distinti, nelle architetture minori è spesso possibile individuarne una sola. Nelle architetture maggiori, poi, la definizione di più zone termiche discende anche dalla compresenza di ambienti di vaste proporzioni e di altri di servizio (sovente organizzati, nei palazzi, su livelli distinti); ciò avviene in particolare quando tali spazi sono deputati a funzioni differenti (per condizioni termiche e igrometriche richieste, per durata e frequenza della fruizione),



Figure 6.6 e 6.7. Esempi di "edifici di borgata" (a sinistra) ed "edifici in linea" (a destra).

specialmente negli edifici ospitanti pubblici servizi. Nell'architettura del centro storico palermitano, inoltre, è comune a tutto l'edificato l'attacco diretto a terra dei locali di pianterreno; soprattutto nell'edilizia minore tali ambienti sono spesso utilizzati come depositi e quindi, secondo le indicazioni della normativa tecnica (UNI EN 6946:2008), possono essere considerati alla stregua di resistenze termiche aggiuntive.

Dunque la struttura tipologica che la normativa urbanistica ed edilizia di Palermo adotta per il costruito storico cittadino richiama, in modo implicito, le prestazioni energetiche e ambientali degli edifici. Una sua rivisitazione, che renda più chiara questa correlazione, può essere utile per indagare il miglioramento prestazionale dell'architettura storica palermitana anche alla luce delle modalità d'intervento consentite dalla normativa vigente.

6.2 L'approccio tipologico allo studio delle prestazioni energetiche degli edifici storici

Diversi studi propongono per l'architettura storica metodi d'indagine speditiva, volti prevalentemente all'analisi strutturale e, in particolare, alla valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici (Lombardo e Cicero, 2014). Nell'ottica di un'integrazione fra gli interventi volti a migliorare il comportamento sismico del costruito storico e quelli mirati ad accrescerne le prestazioni energetiche, Boarin e Davoli (2013) hanno proposto un metodo speditivo di diagnosi energetica, sviluppato mediante l'applicazione a due borghi montani dell'Italia centromeridionale, fortemente danneggiati da eventi sismici. Il metodo si basa su un'analisi sommaria di caratteristiche degli edifici che ne influenzano le prestazioni energetiche e ambientali; fra queste rientrano la morfologia della fabbrica, i materiali e le tecniche costruttive, la presenza di ponti termici e spazi di filtro, il degrado strutturale, la consistenza e il pregio degli elementi decorativi. Con l'analisi di alcuni edifici rappresentativi si sono individuati valori di riferimento per la valutazione energetica delle altre costruzioni; le prestazioni di queste sono state determinate in base alle differenze tecnologiche e dimensionali rispetto agli edifici di riferimento e introducendo delle correzioni per la presenza di ponti termici e spazi di filtro. In relazione alle condizioni climatiche dei due siti esaminati, gli autori hanno proposto strategie di miglioramento articolate in tre forme d'intervento. Queste differiscono per l'impatto sulla costruzione e sono associate agli edifici in base alle diverse esigenze di tutela per questi riconosciute. In particolare sono proposti: interventi conservativi, nei quali il miglioramento energetico è perseguito in misura minima; interventi di "restauro energetico", volti soprattutto a ripristinare i sistemi passivi di controllo termico e ambientale propri dell'architettura storica; interventi di riqualificazione più consistenti, per gli edifici più recenti e di minor valore documentale. Si sono così dedotti i risparmi e gli incrementi prestazionali potenzialmente conseguibili sull'intero comparto edilizio.

Il ricorso a modelli a vasta scala per indagare le prestazioni degli edifici e indirizzare strategie d'intervento è ampiamente diffuso nell'ambito delle valutazioni energetiche (Reinhart e Cerezo Davila, 2016). In genere, si distinguono modelli *top-down*, *bottom-up* e ibridi (Ambrogio e Zuppiroli, 2013 e Berg, 2015). Nei primi, adoperati per elaborare e

verificare politiche d'intervento o per individuare valori di riferimento (*benchmark*), il campione oggetto d'indagine è esaminato in modo esteso, facendo cioè riferimento a tutti gli elementi che lo compongono. Questi metodi, quindi, partendo dal fabbisogno energetico di un ambito vasto, progressivamente suddividono il parco edilizio analizzato in gruppi più piccoli; poiché tuttavia partono dalle condizioni attuali, sono poco adatti ad analisi avanzate oppure quando l'analisi si concentra su un ambito specifico. Il metodo *bottom-up*, invece, seleziona per lo studio una parte del campione ed è considerato particolarmente adatto all'analisi energetica (Reinhart e Cerezo Davila, 2016). Una disamina di applicazioni è riportata da Berg (2015) e da Ambrogio e Zuppiroli (2013). Questi ultimi, peraltro, esaminano l'applicazione al costruito storico di Ferrara sia di metodi *top-down* e *bottom-up* alla scala urbana sia di un metodo speditivo a scala inferiore.

Nel primo caso gli autori, integrando le banche dati catastali con le informazioni raccolte dai fornitori energetici, ricavano per ogni unità immobiliare un indice di consumo energetico. L'approssimazione dei risultati, dovuta soprattutto alla difficoltà d'integrazione fra i dati raccolti, induce tuttavia Ambrogio e Zuppiroli a ritenerli inadeguati a caratterizzare le prestazioni energetiche del comparto edilizio esaminato. Nel metodo speditivo, invece, gli autori propongono un'applicazione semplificata del metodo di calcolo della norma UNI/TS 11300-1:2008 ad alcune parti significative del tessuto storico ferrarese. Assimilata ogni unità immobiliare a una zona termica e integrate le informazioni planimetriche catastali con rilievi speditivi delle fronti architettoniche, alcune rilevanti semplificazioni riguardano i parametri termici dei componenti d'involucro. In particolare, si attribuisce a ciascuna classe di elementi tecnici un unico valore di trasmittanza: di conseguenza per le murature è stato imposto uno spessore medio di 35 cm. I risultati ottenuti per ciascuna unità immobiliare, ovvero il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento invernale, il fabbisogno di energia primaria e l'indice di prestazione energetica, sono stati sintetizzati rispetto agli edifici e inseriti in un sistema informativo territoriale per consentire l'integrazione e l'aggiornamento dei dati.

Nell'approccio *bottom-up*, i modelli energetici a scala urbana combinano fra loro dati climatici, geometria e modalità d'uso degli edifici, aspetti costruttivi e impiantistici. Mentre per le caratteristiche geometriche, quali la morfologia dell'involucro e l'estensione delle parti finestrate, è relativamente semplice avere informazioni dettagliate per un parco edilizio ampio, il contrario si verifica per gli aspetti costruttivi e impiantistici, che sono infatti la fonte principale delle differenze fra i risultati delle simulazioni energetiche e i valori effettivi. Pertanto i modelli, segmentando il parco edilizio esaminato in gruppi e caratterizzando gli aspetti che ne influenzano le prestazioni energetiche (composizione degli elementi tecnici, modalità d'uso e impianti), individuano edifici reali o virtuali che siano rappresentativi di un insieme più ampio.

Significativo è il progetto europeo TABULA (2009-2012, proseguito in EPISCOPE per il periodo 2013-2016), che, rivolto al patrimonio residenziale europeo, ha proposto una struttura armonizzata per definire tipologie edilizie a scala nazionale, fondate sulla consi-

stenza e sull'epoca di costruzione. Per ciascuno dei tredici Paesi coinvolti nello studio, è stata proposta una descrizione tipologica, attraverso la quale valutare il fabbisogno energetico degli edifici ed esaminare i costi e i benefici di possibili miglioramenti. In quest'ottica, in sette dei Paesi partecipanti, le tipologie sono state impiegate per elaborare un modello del comparto edilizio residenziale.

Nel caso italiano (Corrado, Ballarini e Corgnati, 2014) è stata proposta innanzitutto una distinzione in tre aree climatiche, quella "media" (corrispondente alla zona climatica E del D.P.R. 412 del 1993), l'"alpina" (F) e la "mediterranea-costiera" (A, B, C, D). Lo studio è stato condotto sulla zona E, che comprende una parte consistente dell'Italia settentrionale. Gli edifici che in essa ricadono sono stati distinti per consistenza edilizia in case monofamiliari, case a schiera, edifici multifamiliari e blocchi di appartamenti. Tali gruppi sono stati poi articolati per epoca di costruzione, sottintendendo in questa anche le caratteristiche ricorrenti dal punto di vista di materiali, tecniche costruttive e impianti, per i quali sono forniti dati indicativi. Per ogni tipo è stato individuato un edificio di riferimento, ideale in alcuni casi e reale in altri, e per ciascuno sono stati calcolati il volume lordo climatizzato, le superfici utile e lorda di pavimento, il rapporto di forma, i numeri di piani e unità immobiliari. Sugli edifici tipo, calcolate le prestazioni energetiche secondo le norme della serie UNI/TS 11300, si sono valutate possibili riqualificazioni, una "tipica" e una "avanzata".




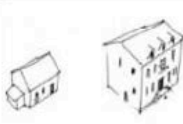
Il progetto TABULA coinvolge tutto il patrimonio residenziale. Infatti riporta i parametri termici utili al calcolo anche per le principali soluzioni costruttive degli elementi

		CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA			
<i>Area climatica media</i>		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Figura 6.8. "Matrice" proposta nel progetto TABULA per descrivere il patrimonio edilizio italiano della zona climatica E. Per alcuni tipi si sono individuati edifici rappresentativi, per altri si è fatto ricorso ad archetipi. Da Corrado et al. (2014).

d'involucro storici. Tuttavia l'attenzione è rivolta essenzialmente all'edificato recente. Nella parte italiana dello studio, l'architettura storica rientra per la quasi totalità nelle prime due classi di epoca costruttiva, cioè quelle degli edifici realizzati entro il 1900 e nel periodo 1901-1920. Mancano specificazioni sui caratteri morfologici e distributivi, così come sulle sensibili differenze che distinguono le soluzioni costruttive in ambito regionale. Per l'architettura storica, inoltre, la valutazione dei possibili miglioramenti energetici non può prescindere dall'esigenza di conservarne i caratteri formali e materiali e dunque dalla compatibilità degli interventi ipotizzati con le restrizioni imposte dalla tutela.

Queste considerazioni si rintracciano nella ricerca francese BATAN, che per analizzare il comportamento termico delle costruzioni storiche nazionali ed elaborare per esso un adeguato modello di calcolo propone una descrizione in *catégories thermiques*. Questa tiene conto delle modalità di aggregazione degli edifici e del contesto in cui ricadono nonché delle loro caratteristiche materiche e costruttive. Analizzando la morfologia degli isolati storici dal punto di vista termico, cioè relativamente alla contiguità (*mitoyenneté*) fra gli isolati, alla loro densità e alle potenzialità di soleggiamento, sono state definite quattro categorie d'insediamento (*catégories d'implantation*). Nell'ambito di ciascuna, sono distinti gli edifici caratterizzati da un'inerzia termica molto elevata (A), elevata (B) o media (C), conseguita ricorrendo a tecniche costruttive differenti; ad esse corrispondono dunque materiali differenti. Questi ultimi, sulla base delle proprietà termiche e igrometriche, sono suddivisi a loro volta in quattro gruppi (rocce molto dense, materiali di densità me-

Implantation	I/ îlots fermés de centre ancien		II/ haussmannien	III/ îlots fermés bas ou maisons alignées		IV/ maisons isolées ou dispersées	
							
Mode constructif	A et B		A	A et B		C	
Matériaux	1	■	■	■	■	■	■
	2	■	■	■	■	■	■
	3				■	■	■
	4		■				■

Matériaux: 4 catégories thermiques

1. **Les roches très denses** : granit, basalte et gneiss + grès quartzeux, calcaire extra-dur, ardoise et schiste.
2. **Les matériaux de densité moyenne** : calcaire tendre, brique de terre cuite pleine.
3. **Les terres crues et roches extra-tendres** : pisé, adobes, bauge, calcaire extra-tendre.
4. **Les matériaux de faible densité**: pierre poreuse naturelle, et bois et sans doute torchis.

Modes constructifs: 3 catégories thermiques

Catégories		Classe d'inertie quotidienne	Classe d'inertie séquentielle	Murs	Plancher bas	Plancher haut
A	Très lourd	Très lourde	Lourde	Pierre/Brique/Terre crue	Pierre/Bois hourdis	Bois
B	Lourd	Lourde	Moyenne	Pierre/Brique/Terre crue	Bois	Bois
C	Moyen	Moyenne	Légère	Torchis	Tous types	Tous types

Figura 6.9. Tipologie termiche per il progetto BATAN. Da BATAN (2011).

dia, terra cruda o rocce molto tenere, materiali a bassa densità). Questa descrizione ha guidato la scelta di quattordici edifici per lo svolgimento dello studio.

Il riferimento a costruzioni rappresentative è presente anche nella metodologia multidisciplinare che Broström et al. (2014) propongono per valutare le conseguenze degli interventi di miglioramento energetico degli edifici storici. Il metodo, elaborato per il patrimonio architettonico svedese ma applicabile anche ad altri contesti geografici, si basa sull'interazione fra l'ottimizzazione tecnico-economica degli interventi e i rischi che questi comportano per il valore culturale e il comportamento termofisico dell'edificio storico. Per bilanciare queste esigenze, il metodo prevede che, definiti gli obiettivi da perseguire in termini sia di conservazione sia d'incremento prestazionale, sulla base di una prima valutazione di rischi e benefici s'individuino, fra le possibili soluzioni, quelle ammissibili; individuata la loro combinazione ottimale per mezzo di un'analisi tecnica ed economica estesa al ciclo di vita, si valutano i rischi che esse comportano per l'edificio, iterando eventualmente il processo. Come primo passo all'applicazione di questa metodologia gli autori considerano una descrizione delle costruzioni attraverso categorie edilizie. Questa consente di analizzare un comparto ampio di edifici storici attraverso poche architetture rappresentative, sulle quali, attraverso il metodo proposto, individuare scelte che possano indirizzare strategie locali d'intervento.

Seguendo quest'impostazione, nell'ambito del progetto europeo EFFESUS (*Energy eF-ficiency for Eu historic districts' SUSTainability*) è stato recentemente sviluppato un metodo

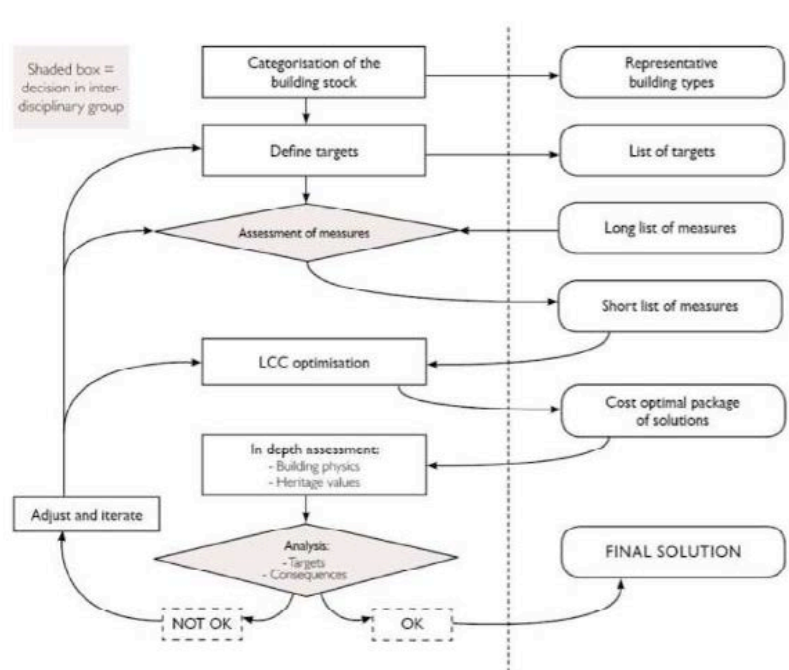


Figura 6.10. Diagramma che illustra la metodologia proposta da Broström et al. (2014) per valutare le potenzialità e le conseguenze di interventi di miglioramento energetico su comparti edilizi storici. Essa si basa sull'esame di pochi edifici rappresentativi, individuati descrivendo il patrimonio edilizio indagato per mezzo di categorie edilizie. Da Broström et al. (2014).

di "categorizzazione" specifico per l'architettura storica, che cioè tiene conto anche delle esigenze della conservazione ed è adattabile alle peculiarità locali. Il metodo, pensato per l'applicazione a comparti edilizi omogenei (*historic districts*), s'inserisce nell'obiettivo generale del progetto, cioè elaborare uno strumento di supporto alla definizione di strategie pubbliche per il miglioramento energetico del patrimonio architettonico storico.

6.3 Metodo di categorizzazione proposto nel progetto europeo EFFESUS

Il metodo proposto dal progetto EFFESUS mira a descrivere un comparto omogeneo di architettura storica per mezzo di categorie edilizie, attraverso le quali individuare un numero contenuto di edifici rappresentativi che, analizzati dettagliatamente nelle loro prestazioni energetiche e possibilità di miglioramento, consentano di dedurre risultati di carattere generale, validi per l'intero comparto esaminato.

In tal modo questo metodo di "categorizzazione" può supportare l'elaborazione di politiche locali di finanziamento ma anche criteri progettuali, volti a individuare, fra le tecnologie di miglioramento energetico degli edifici, quelle che applicate all'architettura storica siano in grado di bilanciare costi e benefici e, soprattutto, siano compatibili con i caratteri e il valore culturale della costruzione.

La struttura del metodo è pensata per essere applicabile in contesti anche molto differenti, sia per le caratteristiche proprie del patrimonio architettonico sia per il livello di dettaglio delle informazioni disponibili. A tal fine, essa si basa sullo *standard* internazionale

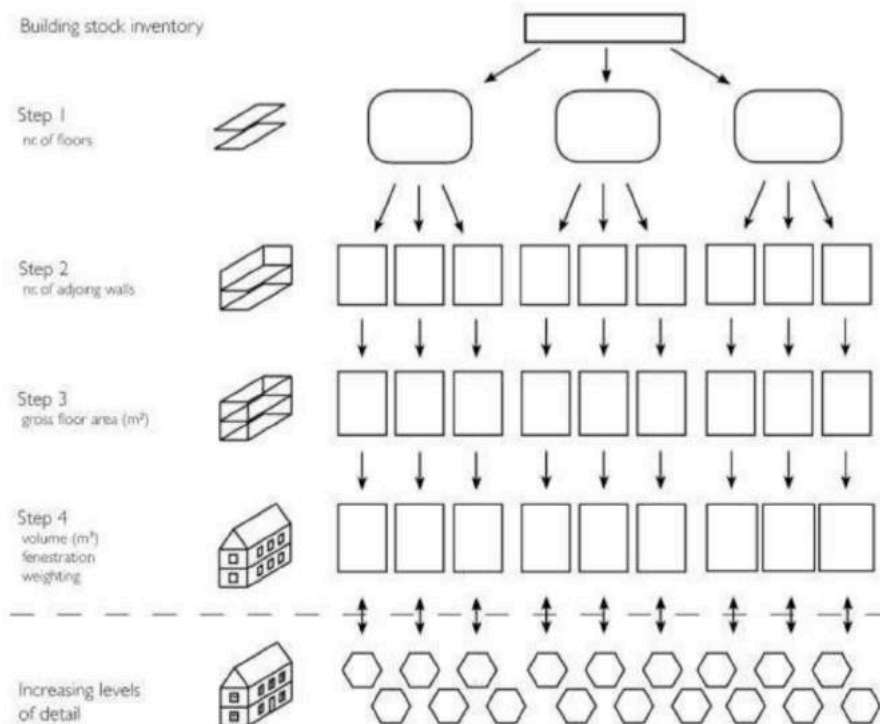


Figura 6.11. Struttura del metodo di "categorizzazione" proposto dal progetto europeo Effesus. Da EFFESUS (2013).

City-GML, che individua progressivi livelli di dettaglio (LoD, *Level of Detail*) nella rappresentazione informatica di grandi parchi edilizi.

Pertanto, la specificazione dell'analisi in relazione alle caratteristiche proprie del contesto locale si fonda su una base uniforme, costituita dalle informazioni che descrivono la consistenza e le modalità di aggregazione degli edifici (fig. 6.11), che sono correlate fortemente alle prestazioni energetiche degli stessi. Le costruzioni sono distinte per categorie attraverso l'analisi del numero di piani, dell'area di sedime e del volume, del numero di pareti perimetrali condivise con le unità adiacenti. Esclusi i gruppi trascurabili dal punto di vista statistico, in termini sia di numero di edifici sia di volumetria, quelli restanti possono essere suddivisi ulteriormente in base ad altre caratteristiche; fra queste, che comprendono le tecniche costruttive e le tipologie impiantistiche, spiccano, in particolare, quelle che rendono conto dei vincoli posti dalle norme locali di tutela.

Il metodo di "categorizzazione", che nel progetto EFFESUS coinvolge anche il centro storico di Genova e quello di Santiago di Compostela, è stato elaborato e verificato sulla città murata di Visby, in Svezia. Questo patrimonio architettonico, tutelato dall'UNESCO, è suddiviso dalla normativa edilizia locale in nove gruppi, basati sull'epoca di costruzione degli edifici (Berg, 2015). Attraverso l'analisi di più di mille costruzioni, il centro storico della città è stato descritto per mezzo di nove categorie, che includono il 70% della volumetria complessiva del campione e l'86% degli edifici esaminati.

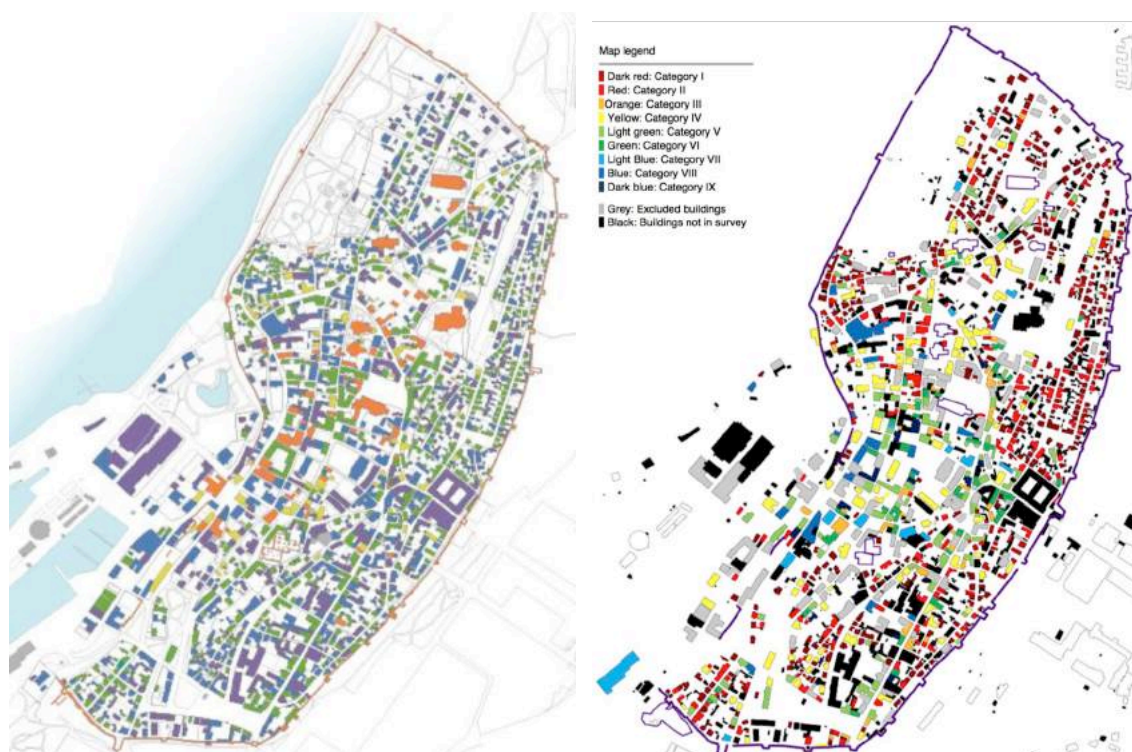


Figure 6.12 e 6.13. Applicazione del metodo di "categorizzazione" del progetto Effesus al centro storico di Visby, in Svezia: a sinistra la tipologia delle normative vigenti, a destra le categorie edilizie proposte. Da Berg (2015)

6.4 Categorie edilizie per il centro storico di Palermo: applicazione al mandamento Castellammare

Nell'ambito della ricerca qui esposta, il metodo per categorie edilizie sviluppato dal progetto EFFESUS è stato verificato attraverso un'applicazione al "mandamento" Castellammare, una delle quattro parti in cui il centro storico di Palermo è tradizionalmente suddiviso. Esso può considerarsi rappresentativo dell'architettura della città murata non solo per il numero consistente di edifici che vi ricadono e sono inclusi in tutte le tipologie del P.P.E., ma anche perché vi si possono rintracciare le principali varianti del tessuto urbano, come l'impianto frastagliato della Vucciria, quello regolare delle addizioni cinquecentesche presso il tracciato delle mura, il taglio della via Roma.

L'analisi svolta ha riguardato più di cinquecento edifici. Per le finalità dello studio si sono escluse le chiese, perché prive di impianti di climatizzazione; si sono tralasciati anche gli edifici successivi alla seconda guerra mondiale e le altre costruzioni realizzate secondo tecniche costruttive non tradizionali (questi ultimi sono parte della tipologia degli edifici definiti come "conseguenti al piano Giarrusso"). Infine non si sono esaminati gli edifici ridotti a rudere, perché per essi non sussistono particolari limiti all'adozione di criteri avanzati di miglioramento energetico, e quelli per i quali il P.P.E. prevede la demolizione senza ricostruzione.

I risultati dell'analisi, per quanto concerne le soglie individuate, il peso delle categorie, i valori medi attribuiti a ciascuna, richiederebbero certamente modifiche e integrazioni se estesi a tutta l'architettura del centro storico. Ulteriori categorie dovrebbero essere introdotte, poi, se l'applicazione coinvolgesse tutto il costruito storico della città: infatti in tal caso bisognerebbe tener conto dell'influenza di un tessuto urbano meno denso, delle soluzioni tecnico-costruttive e di alcune novità distributive proprie dell'architettura ottocentesca. L'applicazione al "mandamento" Castellammare è però sufficiente al suo scopo, cioè dimostrare la possibilità d'integrare la struttura tipologica della normativa vigente con un insieme di categorie edilizie correlate alle prestazioni energetiche delle costruzioni.

6.4.1 Scelta e raccolta dei dati

Le fonti principali d'informazioni impiegate per lo svolgimento dell'analisi sono gli elaborati grafici del P.P.E. del Centro storico (in particolare i fogli della tavola 14) e la "Carta tecnica" del 1982, rilievo aerofotogrammetrico che riporta per tutta la città antica la geometria delle coperture e le quote sul livello del mare dei colmi, delle gronde e delle strade. Le informazioni di questi elaborati, a causa delle molte trasformazioni intercorse nei decenni successivi ai rilevamenti, sono state verificate confrontandole con fotografie aeree più recenti, tratte da *Bing Mappe* e da *Google Earth* (autunno 2014). Per alcune costruzioni sono stati anche necessari dei sopralluoghi esterni; nello studio, infatti, i confini attribuiti agli edifici sono quelli che nel P.P.E. delimitano le unità edilizie, ma sussistono talvolta discrepanze considerevoli rispetto alla situazione attuale.

Per ogni unità edilizia, i dati raccolti riguardano essenzialmente le caratteristiche geo-

metriche e distributive, in particolare l'area di sedime, la lunghezza del perimetro di base della costruzione, il suo volume e il numero di piani, la presenza e le dimensioni dei cortili esclusivi e di quelli comuni. Invece, pur nella varietà delle soluzioni esistenti, le caratteristiche materiche e costruttive degli edifici storici palermitani sono piuttosto omogenee e sarebbe arduo ricorrere ad esse, o all'epoca di costruzione, per distinguere le architetture della città storica. Ciò è anche l'effetto di attività costruttive che, attraverso accorpamenti, divisioni e ampliamenti avvenuti nel corso di secoli, hanno accomunato e spesso interconnesso architetture auliche ed elenali. Fra queste le principali differenze costruttive sono in buona parte conseguenza delle soluzioni spaziali dell'architettura monumentale (ad esempio le grandi proporzioni degli ambienti di rappresentanza) e possono ritenersi implicite nella descrizione tipologica del P.P.E.

La tipologia di riferimento di ciascun edificio nel Piano particolareggiato è rilevante anche perché dà conto di alcune costanti distributive degli edifici e soprattutto delle restrizioni di tutela (cfr. par. 6.1). Al fine di garantire l'omogeneità dei dati per tutti gli edifici, per quelli che fanno parte del "rione Castello San Pietro", oggetto di un precedente Piano di Recupero e non incluso nel P.P.E., la tipologia è stata attribuita per analogia con le caratteristiche delle altre costruzioni del "mandamento".

Non è stato invece possibile analizzare i dati relativi agli impianti esistenti e ai consumi energetici degli edifici. Le difficoltà di raccogliarli nascono innanzitutto dall'accesso ai certificati energetici, di cui molti edifici non sono dotati e la cui attendibilità è peraltro limitata. D'altro canto, queste informazioni non sarebbero comunque disponibili per molte costruzioni che versano tuttora in stato di persistente degrado o abbandono.

L'analisi è stata condotta adoperando la mappa vettoriale georeferenziata del centro stori-



Figura 6.14. Estratto dal foglio 01 della tavola 14 del P.P.E. del Centro storico (1993).

co di Palermo, che riporta la perimetrazione delle unità edilizie del Piano Particolareggiato. I necessari aggiornamenti sono stati aggiunti per sovrapposizione con le immagini aeree disponibili. I dati riguardanti ogni unità edilizia sono stati raccolti attraverso il programma *QUANTUM GIS*, nel quale a ciascuna è associato un poligono, ed elaborati in *Microsoft Office Excel*.

Nella metodologia proposta dal progetto EFFESUS le informazioni di base per definire le categorie edilizie, e sulle quali sviluppare eventuali approfondimenti, sono l'area di sedime, il numero di murature perimetrali condivise e il numero di piani; il volume si ricava da quest'ultimo adoperando un'altezza media d'interpiano.

Nel caso palermitano, il calcolo dell'area di sedime tiene conto di spazi esterni coperti, quali i porticati, solo se questi sono sovrastati da spazi chiusi. Per esprimere la consistenza delle unità edilizie con sufficiente approssimazione, invece, non è possibile, come suggerito da EFFESUS, ricorrere al numero di elevazioni. Una prima motivazione sta nell'impossibilità di definire un valore d'interpiano sufficientemente omogeneo, pure nell'ambito delle singole tipologie del P.P.E.¹²; una seconda ragione, legata allo sviluppo storico delle unità edilizie per progressive sopraelevazioni all'interno della città murata, consiste nella frequente difficoltà di associare a un edificio un unico numero di piani.

La consistenza delle unità edilizie è stata espressa allora direttamente in termini di volume, che è possibile calcolare in modo attendibile grazie alle informazioni contenute nella Carta tecnica. A tal fine, l'area di ogni unità edilizia è stata suddivisa in parti, corrispondenti a coperture piane, a falda semplice o doppia. A ciascuna è stata attribuita la quota riportata nella Carta (la media fra quelle di colmo e di gronda nel caso di coperture inclinate). Per determinare l'altezza di ogni parte, alla quota sul livello del mare si è sottratta quella stradale: poiché però questa è indicata per pochi punti, si sono determinate li-

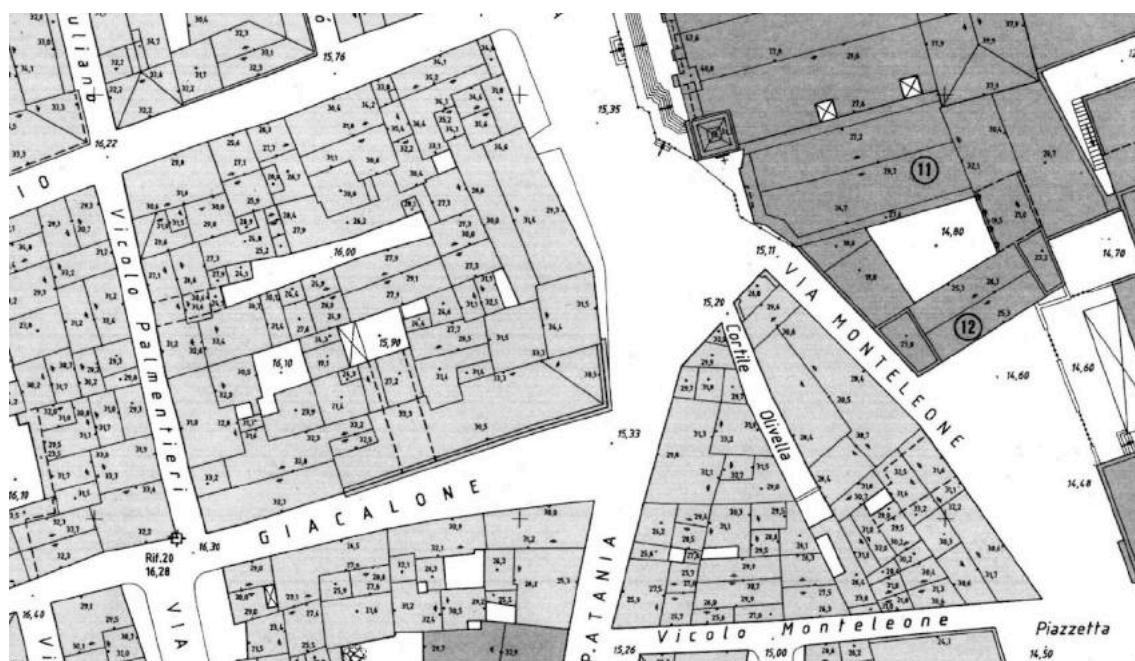


Figura 6.15. Estratto dal foglio 01 della Carta tecnica (1982).

nearmente alcune quote intermedie, e ciascuna è stata associata a un breve segmento di strada considerato orizzontale. Nel calcolo volumetrico, svolto in *Microsoft Office Excel* sulla base delle aree determinate in *QUANTUM GIS* e delle altezze desunte dalla Carta tecnica, si sono sottratti inoltre i volumi degli spazi esterni coperti, quali logge e passaggi. Non si sono invece considerate le indicazioni del P.P.E. in merito alle superfetazioni.



Figura 6.16. Poligoni relativi alle singole unità edilizie (a sinistra) e poligoni per il calcolo dei volumi (a destra).

Rispetto alla struttura generale proposta dal progetto EFFESUS, un secondo adattamento riguarda la frazione d'involucro condivisa con le unità edilizie adiacenti. La conformazione degli edifici del centro storico di Visby, infatti, consente di adoperare il numero di murature perimetrali condivise per rappresentare le modalità di aggregazione degli edifici nel tessuto urbano e, quindi, per esaminarne l'influenza sull'estensione dell'involucro esposto all'ambiente esterno (Berg, 2015). Nel caso di Palermo, questo parametro non è significativo, in quanto quasi tutti gli edifici fanno parte di isolati urbani dalla morfologia complessa e hanno essi stessi una forma irregolare, essendo il risultato dell'accorpamento o della divisione di costruzioni preesistenti. Inoltre nell'architettura storica palermitana è ricorrente la presenza del cortile, le cui dimensioni possono essere molto varie.

Si è ritenuto opportuno adottare un unico parametro per tener conto sinteticamente di queste caratteristiche. A tal fine si fa riferimento al perimetro di base dell'edificio¹³ e alle sue due parti, quella libera, cioè esposta su spazi pubblici o cortili, e quella condivisa con le unità edilizie adiacenti. Esse sono legate all'estensione dell'involucro esterno se si assume che le parti libera e condivisa dell'involucro siano tali per tutto lo sviluppo verticale delle unità edilizie. Tale semplificazione è accettabile in quanto l'altezza delle costruzioni in centro storico è piuttosto omogenea. Peraltro, determinando per ciascuna unità edilizia un'altezza media e assumendo come superficie di copertura quella di sedime, si può calcolare in modo approssimato il rapporto fra la superficie disperdente dell'involucro e il volume dell'edificio, correlabile al parametro, S/V , al quale la normativa nazionale lega i limiti ammissibili per il coefficiente globale di scambio termico (D.M. 26 giugno 2015). Nella tabella 6.1, che si riporta di seguito, sono raccolti i dati adoperati per l'analisi del campione edilizio.



Figura 6.17. Carta schematica del mandamento "Castellammare" con l'indicazione dei codici assegnati agli isolati oggetto di studio.

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
1	101	Palazzo	632,1	5	130,2	34,7	73,3%	13698
1	102	Pal.tto	88,3	5	38,2	23,2	39,1%	2011
1	103	Pal.tto	152,4	4	59,6	34,1	42,9%	2696
1	104	Palazzo	915,1	4	186,6	46,6	75,1%	20002
1	105	Pal.tto	281,2	5	92,9	40,5	56,4%	5834
1	106	Cat. m.	124,3	3	49,4	16,9	65,9%	1704
1	107	Cat. m.	161,4	4	62,2	38,1	38,7%	2854
1	108	Palazzo	676,2	5	197,3	56,0	71,6%	13893
1	109	Palazzo	677,4	5	140,9	49,1	65,1%	15983
1	110	Palazzo	408,9	4	114,4	49,8	56,5%	7635
2	201	Pal.tto	195,1	5	56,5	13,3	76,5%	4128
2	202	Pal.tto	203,4	5	57,4	25,1	56,3%	4218
2	203	Palazzo	448,5	3	99,3	27,3	72,5%	6715
2	204	Pal.tto	312,4	4	95,7	30,2	68,4%	3902
2	205	Cat. m.	159,3	3	55,5	24,6	55,8%	1912
2	206	Cat. s.	48,3	4	31,2	11,8	62,1%	724
2	207	Palazzo	334,5	5	92,5	26,4	71,5%	6203
2	208	Palazzo	490,3	5	134,5	50,1	62,7%	9758
2	209	Palazzo	714,2	5	141,1	25,7	81,8%	15953
3	301	Pal.tto	73,2	4	47,0	11,7	75,1%	1301
4	401	Pal.tto	358,1	4	89,2	37,2	58,2%	7110
4	402	Palazzo	284,0	4	101,8	44,5	56,3%	5453
4	403	Palazzo	305,9	5	97,5	31,8	67,4%	6271
4	404	Palazzo	530,7	4	148,8	47,0	68,4%	6982
4	405	Palazzo	382,1	3	113,4	33,5	70,5%	5836
5	501	Palazzo	1574,0	4	282,2	52,3	81,5%	30984
5	503	Palazzo	478,6	5	130,2	29,5	77,3%	7090
5	504	Palazzo	285,2	4	70,0	37,3	46,8%	5270
5	505	Palazzo	260,0	3	93,5	44,6	52,2%	4059
5	506	Cat. m.	84,7	2	41,8	18,4	56,0%	566
5	507	Pal.tto	135,0	4	51,5	19,2	62,7%	2156
5	508	Pal.tto	92,2	5	49,3	28,9	41,4%	1696
5	509	Cat. m.	230,8	2	68,8	40,6	41,0%	1356
5	511	Cat. m.	123,3	3	44,9	20,2	55,1%	1184
5	512	E. s. re.	1452,0	2	391,4	142,5	63,6%	11502
5	517	Cat. m.	49,0	4	32,1	27,2	15,4%	690
5	518	Cat. m.	60,7	4	34,8	29,5	15,2%	855
5	519	Cat. m.	60,1	4	34,4	29,4	14,4%	908
5	520	Cat. m.	66,9	4	35,3	26,9	23,7%	862
5	521	Cat. m.	56,4	4	51,6	22,3	56,9%	801
5	522	Cat. m.	156,7	4	54,3	29,5	45,6%	2202
5	523	Palazzo	894,0	3	166,5	74,9	55,0%	15068
5	525	Cat. m.	84,6	4	36,9	24,0	35,0%	1063
5	526	Cat. s.	30,3	5	23,3	19,4	16,9%	485
5	527	Pal.tto	358,2	4	112,8	62,7	44,4%	5780
5	528	Pal.tto	99,8	5	41,2	21,9	46,7%	2120
5	529	Pal.tto	211,8	5	58,1	28,9	50,2%	4590
5	530	Pal.tto	177,7	4	73,6	16,2	78,0%	3365
6	601	Palazzo	470,0	5	135,2	14,5	89,3%	10401
6	602	Pal.tto	79,1	5	37,8	20,4	46,0%	1342
6	603	Cat. s.	37,8	5	24,7	19,0	23,0%	640
6	604	Cat. s.	66,0	5	33,0	22,7	31,3%	1155
7	701	Pal.tto	67,8	5	34,6	11,4	67,1%	1300
7	702	Cat. m.	116,1	5	46,0	25,9	43,7%	2271
7	703	Cat. m.	131,0	4	46,4	24,8	46,6%	2058
7	704	Cat. m.	71,3	5	37,9	24,7	35,0%	1187

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
7	705	Cat. m.	88,3	4	42,2	25,6	39,4%	1457
7	706	Cat. m.	127,7	4	46,3	11,0	76,2%	1750
7	707	Cat. s.	21,7	5	20,4	17,5	14,2%	409
7	711	Cat. s.	17,8	4	17,9	14,9	16,9%	235
8	801	Cat. m.	86,8	5	37,7	10,8	71,4%	1631
8	802	Cat. m.	120,6	5	44,0	22,0	50,0%	2255
8	803	Palazzo	453,4	4	110,3	27,0	75,5%	9293
8	804	Pal.tto	383,2	5	85,6	15,9	81,5%	8584
9	901	Pal.tto	192,1	5	68,2	16,7	75,6%	3996
9	902	Pal.tto	94,5	4	48,6	20,8	57,2%	1853
9	903	Palazzo	568,2	5	171,4	76,1	55,6%	10828
9	904	Pal.tto	221,2	5	89,3	50,0	44,0%	3571
9	905	Cat. s.	69,1	4	41,9	20,3	51,5%	996
9	906	Cat. s.	60,8	4	33,9	26,2	22,8%	687
9	907	Cat. s.	64,6	5	32,3	22,0	31,9%	1138
9	908	Cat. s.	91,4	5	40,6	26,2	35,6%	1672
9	909	Pal.tto	142,0	5	53,9	27,8	48,5%	2720
10	1001	Pal.tto	134,6	5	58,5	18,9	67,7%	3117
10	1002	Palazzo	187,3	5	73,2	27,3	62,7%	4170
10	1003	Cat. m.	138,5	5	58,3	20,7	64,6%	2476
10	1004	Cat. m.	114,1	5	44,0	26,7	39,3%	2192
11	1101	Palazzo	960,5	4	170,4	22,9	86,5%	20480
11	1102	Palazzo	488,0	4	129,0	50,7	60,7%	10910
11	1103	Cat. s.	50,7	5	29,3	17,1	41,6%	1119
11	1104	Pal.tto	146,5	4	67,6	26,9	60,2%	2773
11	1105	Cat. m.	97,6	4	49,1	22,3	54,6%	1772
11	1106	Cat. s.	29,5	5	22,4	13,7	39,0%	615
11	1107	Cat. m.	123,5	5	45,5	17,7	61,1%	2605
12	1201	Palazzo	846,2	4	193,8	65,0	66,5%	16247
12	1202	Cat. m.	96,7	5	48,4	25,6	47,1%	2324
12	1204	Cat. m.	88,8	5	51,6	47,0	9,0%	1844
12	1205	Cat. m.	187,2	5	75,3	40,3	46,5%	3822
12	1206	Cat. s.	54,1	4	29,7	15,2	48,9%	863
12	1207	Cat. s.	38,9	4	24,9	19,2	22,9%	560
12	1208	Cat. m.	84,4	4	38,3	16,6	56,7%	1268
12	1209	Cat. m.	111,3	4	53,2	25,3	52,4%	1417
12	1210	Cat. m.	51,0	3	32,5	27,4	15,6%	506
12	1211	Cat. s.	29,6	4	23,0	19,0	17,4%	521
13	1301	Palazzo	390,6	4	106,8	36,4	66,0%	7015
13	1302	Cat. m.	172,4	4	63,3	36,6	42,3%	2513
13	1303	Cat. m.	110,3	4	50,1	36,4	27,4%	1703
13	1304	Cat. m.	82,6	5	43,2	31,6	26,7%	1795
13	1305	Cat. m.	102,8	5	45,1	33,3	26,2%	2218
13	1306	Cat. m.	66,3	4	34,9	25,0	28,2%	1084
13	1307	Cat. m.	100,1	4	53,6	33,2	38,0%	1689
13	1308	Cat. m.	63,7	5	32,9	19,2	41,6%	1068
13	1309	Cat. s.	33,6	5	23,5	18,4	21,6%	626
13	1310	Cat. m.	45,0	5	29,1	20,0	31,4%	904
13	1311	Cat. m.	37,8	5	29,1	23,6	18,9%	796
13	1312	Cat. m.	159,6	5	61,7	24,9	59,6%	2851
13	1313	Cat. m.	37,4	5	26,7	20,8	22,1%	608
13	1314	Cat. m.	59,9	4	33,5	22,2	33,7%	977
13	1315	Cat. m.	78,0	5	42,6	23,4	45,0%	1565
13	1316	Cat. m.	74,8	5	57,6	27,3	52,6%	1464
13	1317	Cat. m.	79,3	5	49,5	29,3	40,8%	1565
13	1318	Cat. m.	75,5	4	37,1	20,0	46,0%	1253

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
13	1319	Cat. m.	57,9	4	33,7	25,1	25,5%	914
13	1320	Palazzo	309,8	4	80,6	40,7	49,5%	5999
13	1321	Cat. m.	32,5	4	24,8	17,1	30,9%	505
14	1401	E. s. civ.	3367,6	4	387,5	0,0	100,0%	76269
15	1501	Palazzo	725,1	4	115,8	17,9	84,6%	13653
15	1502	Cat. m.	123,5	5	49,2	34,9	29,0%	2482
15	1503	Pal.tto	255,0	5	77,0	33,8	56,1%	5117
15	1504	Pal.tto	261,0	5	76,4	33,4	56,4%	5466
18	1801	Palazzo	703,0	4	124,5	18,7	85,0%	13967
18	1802	Cat. m.	174,4	4	65,5	31,5	51,9%	2924
18	1803	Pal.tto	236,8	4	72,5	12,8	82,3%	4485
19	1901	Palazzo	822,7	4	218,3	91,8	57,9%	12837
19	1902	Palazzo	2375,9	3	382,6	107,8	71,8%	41862
19	1905	Palazzo	398,3	5	109,6	50,8	53,7%	7580
19	1906	Pal.tto	191,8	4	67,2	18,3	72,8%	3386
19	1907	Cat. m.	115,3	5	45,2	28,8	36,3%	1861
19	1908	Pal.tto	116,0	4	71,5	28,6	60,1%	2122
19	1909	Pal.tto	77,1	4	37,0	24,1	35,0%	1214
19	1910	Palazzo	383,0	4	110,5	34,9	68,4%	6251
19	1911	Cat. m.	86,1	2	40,6	31,6	22,2%	732
19	1912	Cat. m.	118,1	5	52,6	23,2	55,9%	2311
20	2001	Palazzo	483,8	4	137,7	53,5	61,2%	6768
20	2002	Palazzo	198,0	4	69,2	29,8	56,9%	3412
20	2003	Pal.tto	154,8	4	51,3	20,5	60,2%	2864
20	2004	Pal.tto	215,4	4	66,6	23,0	65,5%	3235
20	2005	Cat. s.	21,0	2	19,1	13,3	30,5%	160
20	2006	Cat. s.	27,4	2	21,8	16,9	22,6%	156
20	2007	Palazzo	272,1	3	93,2	60,8	34,8%	3443
20	2009	Cat. m.	97,0	4	43,3	24,4	43,6%	1690
20	2010	Cat. s.	67,3	3	34,0	25,0	26,5%	825
20	2012	Cat. s.	78,3	4	44,4	26,9	39,5%	785
20	2013	Pal.tto	217,9	4	61,0	21,2	65,2%	3526
20	2014	Cat. m.	106,4	3	44,6	33,2	25,6%	1311
20	2015	Palazzo	408,5	4	126,3	51,1	59,5%	6086
20	2016	Cat. s.	49,1	5	28,1	14,2	49,5%	847
20	2017	Cat. s.	46,5	4	27,4	13,7	50,1%	674
20	2018	Cat. m.	121,9	4	52,0	35,0	32,7%	1779
20	2019	Cat. s.	37,1	2	24,7	19,7	20,2%	268
20	2020	Cat. s.	37,4	4	24,7	19,3	21,7%	495
20	2021	Cat. s.	38,4	5	24,8	18,6	25,2%	541
21	2101	Pal.tto	296,6	4	69,7	16,0	77,0%	5378
21	2102	Pal.tto	265,0	4	77,8	39,9	48,7%	5283
21	2103	Pal.tto	218,9	4	76,8	23,9	68,8%	4627
22	2201	Pal.tto	212,7	5	68,8	14,1	79,6%	5050
22	2202	Pal.tto	252,5	5	63,9	28,2	55,8%	4407
22	2203	Pal.tto	157,4	4	51,0	15,2	70,2%	2741
23	2301	Palazzo	569,9	5	173,0	0,0	100,0%	11134
24	2401	Palazzo	941,5	4	195,3	47,0	75,9%	16508
24	2402	Cat. m.	80,9	3	43,0	19,9	53,7%	1064
24	2403	Cat. m.	135,2	3	53,7	22,4	58,2%	1945
24	2404	Cat. s.	71,2	4	37,9	9,4	75,1%	1003
24	2405	Cat. s.	73,3	4	40,7	22,5	44,6%	1122
25	2501	Cat. m.	103,1	4	42,3	8,7	79,4%	1803
25	2502	Cat. m.	99,1	4	39,8	18,8	52,7%	1660
25	2503	Cat. m.	161,1	3	51,4	10,1	80,3%	2077
26	2601	Pal.tto	113,6	4	59,4	14,0	76,4%	2329
26	2602	Pal.tto	184,5	4	71,2	33,4	53,1%	3376
26	2603	Palazzo	536,2	4	110,4	19,4	82,5%	9391
27	2701	Palazzo	288,2	4	78,6	18,7	76,3%	5221
27	2702	Pal.tto	216,0	4	60,9	18,7	69,4%	3719
28	2801	Cat. m.	186,7	5	66,8	25,5	61,9%	3636
28	2802	Cat. m.	46,6	3	32,6	25,2	22,7%	572
28	2803	Pal.tto	218,6	5	67,3	41,9	37,7%	4070
28	2804	Palazzo	242,3	4	90,3	32,9	63,6%	3926
28	2806	Cat. m.	131,6	5	51,0	20,9	59,0%	2625
28	2807	Pal.tto	143,0	4	49,4	23,4	52,7%	2082
28	2808	Cat. m.	159,0	5	51,6	18,9	63,5%	2497
28	2810	Cat. m.	55,2	5	30,1	16,8	44,3%	1178
28	2811	Cat. m.	42,8	5	28,0	17,5	37,4%	936
28	2812	Cat. s.	47,2	5	27,8	15,9	42,7%	1036
28	2813	Cat. s.	27,9	5	22,7	15,5	31,9%	490
28	2814	Cat. s.	26,9	5	22,2	15,0	32,4%	446
28	2815	Cat. s.	51,4	5	28,7	7,4	74,2%	986
28	2816	Palazzo	464,0	4	118,0	24,8	79,0%	8707
29	2901	Pal.tto	249,2	4	71,1	25,1	64,7%	3781
29	2902	Cat. m.	127,4	5	68,0	39,3	42,3%	2326
29	2903	Cat. m.	100,9	5	52,5	45,6	13,0%	1911
29	2904	Cat. m.	115,2	5	55,2	39,2	29,1%	1923
29	2905	Cat. m.	106,3	4	50,7	38,1	24,9%	1746
29	2906	Cat. m.	156,4	4	68,9	35,7	48,1%	2372
29	2907	Cat. m.	107,6	4	51,6	36,0	30,2%	1769
29	2908	Cat. m.	187,8	4	75,8	41,5	45,3%	3032
29	2909	Cat. m.	151,4	4	75,7	51,9	31,4%	2789
29	2910	Cat. m.	96,7	4	45,1	29,7	34,2%	1570
29	2911	Cat. m.	264,5	4	107,7	57,2	46,9%	3754
29	2912	Pal.tto	181,8	4	69,9	13,8	80,2%	2594
29	2913	Cat. m.	129,0	4	49,7	33,1	33,4%	1725
29	2914	Cat. m.	68,1	5	39,0	26,5	32,1%	996
29	2915	Cat. m.	85,8	3	46,2	16,0	65,5%	1072
29	2916	Cat. m.	116,5	5	43,2	17,8	58,8%	1864
29	2917	Cat. m.	67,6	4	39,6	7,5	81,1%	984
29	2918	Pal.tto	129,3	4	50,5	16,7	66,9%	1979
29	2919	Cat. m.	91,8	5	42,7	8,7	79,7%	1671
29	2920	Pal.tto	202,0	4	69,0	22,0	68,2%	3724
29	2921	E. s. re.	394,5	5	112,4	9,4	91,7%	7642
29	2922	Cat. s.	32,5	2	25,8	13,0	49,5%	261
30	3001	Pal.tto	144,1	5	48,9	24,7	49,4%	2781
30	3002	Pal.tto	169,3	5	52,4	26,0	50,4%	3477
30	3005	Pal.tto	512,8	4	139,4	59,4	57,4%	7701
30	3006	Cat. m.	45,6	4	33,8	26,3	22,0%	707
30	3007	Cat. m.	147,9	4	63,0	38,7	38,7%	2429
30	3008	Cat. m.	112,1	4	43,9	28,3	35,5%	1856
30	3010	Palazzo	346,0	4	104,2	54,2	48,0%	5836
30	3011	Cat. m.	90,3	4	44,7	37,9	15,2%	1588
30	3012	Cat. s.	50,9	5	30,2	13,9	54,1%	854
30	3013	Cat. s.	29,5	5	21,8	16,2	25,6%	469
30	3014	Cat. m.	124,3	4	50,1	38,6	23,0%	1939
30	3015	Cat. s.	69,3	5	45,2	20,9	53,7%	1402
30	3016	Cat. m.	74,6	5	37,4	25,2	32,7%	1361
30	3017	Cat. m.	133,2	4	54,9	28,2	48,7%	2113
30	3018	Cat. m.	109,2	4	46,8	25,8	44,9%	1792
30	3019	Cat. m.	73,5	4	38,6	19,5	49,5%	1195

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
30	3022	Cat. m.	84,4	3	37,9	23,9	36,9%	866
30	3023	Cat. m.	129,7	4	46,2	14,7	68,1%	2064
30	3029	Cat. m.	227,4	3	76,7	20,4	73,4%	3085
30	3030	Pal.tto	185,1	4	56,3	21,9	61,0%	3142
30	3031	Pal.tto	183,2	4	62,0	35,9	42,1%	2947
30	3032	Palazzo	1049,4	4	182,3	21,0	88,5%	15614
30	3033	Cat. m.	139,5	3	50,9	31,3	38,5%	2025
30	3034	Cat. m.	106,1	3	41,8	28,1	32,9%	1527
30	3035	Cat. m.	96,2	5	43,5	28,8	33,8%	1731
30	3036	Cat. m.	109,8	5	46,9	33,5	28,6%	1693
31	3101	Cat. m.	209,5	5	59,0	16,3	72,4%	4015
31	3102	Pal.tto	267,7	5	66,0	32,7	50,5%	5135
31	3103	Cat. m.	150,6	4	53,6	32,3	39,8%	2093
31	3104	Cat. m.	48,4	4	31,3	12,8	59,2%	463
31	3105	Pal.tto	338,5	4	105,0	26,4	74,9%	6066
32	3201	Palazzo	636,8	4	121,0	16,8	86,1%	11479
32	3202	Palazzo	263,1	4	77,3	25,4	67,2%	4855
32	3203	Pal.tto	226,1	5	79,2	23,1	70,8%	3775
32	3204	Pal.tto	231,9	4	71,8	30,8	57,1%	4363
32	3205	Cat. m.	77,9	4	40,5	20,2	50,2%	1355
32	3206	Cat. m.	264,2	5	97,8	38,2	60,9%	4462
32	3207	Pal.tto	302,3	4	80,1	40,1	50,0%	5373
32	3208	Cat. m.	127,3	4	51,1	33,5	34,4%	2177
32	3209	Cat. m.	84,8	4	37,5	13,3	64,7%	1389
32	3210	Cat. s.	42,0	4	29,0	21,5	25,9%	639
32	3211	Cat. m.	92,2	4	45,0	11,5	74,5%	1419
33	3301	Palazzo	380,8	4	113,1	22,5	80,1%	7150
33	3302	Pal.tto	220,7	4	77,1	38,9	49,6%	3743
33	3303	Cat. m.	177,4	4	74,4	28,8	61,3%	3083
33	3304	Cat. m.	141,0	4	48,2	23,2	51,9%	2446
33	3305	Pal.tto	127,1	4	58,6	19,0	67,5%	1997
33	3306	Pal.tto	365,5	3	138,7	31,4	77,3%	4374
33	3307	Pal.tto	274,0	4	68,9	15,9	76,9%	4456
33	3308	Cat. m.	52,9	4	40,1	28,6	28,6%	587
34	3402	Cat. m.	109,8	4	45,5	7,8	82,9%	1605
35	3501	Cat. m.	83,7	2	37,6	8,4	77,7%	841
35	3502	Cat. m.	88,6	5	38,2	15,9	58,5%	1619
35	3503	Pal.tto	149,4	5	54,2	17,4	67,9%	2731
35	3504	Cat. s.	57,6	5	33,2	15,0	54,7%	999
35	3505	Cat. s.	48,0	5	28,2	19,9	29,5%	812
35	3506	Cat. s.	38,7	5	25,2	19,6	22,2%	632
35	3507	Pal.tto	248,3	4	92,8	48,8	47,4%	4072
35	3508	Cat. m.	81,3	5	39,0	32,9	15,6%	1624
35	3509	Cat. m.	108,5	5	58,3	19,4	66,8%	1894
35	3510	Cat. m.	161,8	4	63,8	31,8	50,2%	2407
36	3601	Pal.tto	70,5	4	33,8	16,8	50,3%	1182
36	3602	Cat. s.	68,9	4	33,3	25,6	22,9%	1164
36	3603	Cat. s.	60,8	5	31,3	23,9	23,6%	1170
36	3604	Pal.tto	76,5	5	35,9	17,6	51,0%	1406
36	3605	Pal.tto	264,5	5	79,9	33,4	58,2%	4422
37	3701	Pal.tto	213,2	4	59,5	16,2	72,7%	4028
38	3801	Cat. m.	99,2	4	43,4	21,4	50,6%	1456
38	3802	Pal.tto	143,6	3	52,1	35,7	31,5%	2041
38	3803	Cat. s.	36,9	3	24,9	12,8	48,7%	410
38	3804	Cat. s.	67,6	4	32,9	23,8	27,6%	990

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
38	3805	Cat. s.	68,5	4	33,5	17,6	47,5%	1084
38	3806	Cat. s.	43,6	4	26,6	13,5	49,2%	645
39	3901	Pal.tto	314,9	5	85,6	21,1	75,3%	6700
39	3902	Pal.tto	88,2	4	38,5	21,1	45,1%	1478
40	4001	Pal.tto	200,7	4	58,2	27,8	52,2%	3722
40	4002	Pal.tto	237,3	5	84,5	52,2	38,3%	4078
40	4003	Cat. m.	126,5	4	62,8	40,7	35,2%	1631
40	4004	Cat. m.	144,6	5	68,9	44,4	35,6%	2432
40	4005	Pal.tto	241,9	4	77,4	41,2	46,8%	3262
40	4006	Cat. m.	73,8	5	36,5	26,3	28,2%	1327
40	4007	Pal.tto	377,5	4	110,1	39,3	64,4%	6362
40	4008	Cat. m.	60,1	4	33,5	21,2	36,8%	972
40	4009	Cat. m.	151,9	4	69,3	23,9	65,5%	2398
40	4011	Cat. m.	172,0	4	61,0	31,2	48,9%	2806
40	4012	Cat. m.	117,7	4	50,6	31,3	38,3%	2072
40	4013	Cat. m.	130,8	5	47,7	24,6	48,4%	2250
40	4014	Cat. m.	147,3	4	55,6	33,4	40,0%	2093
40	4015	Cat. m.	222,4	4	74,7	40,5	45,7%	3763
40	4016	Cat. m.	97,5	4	41,1	27,6	32,7%	1519
41	4101	Cat. m.	82,1	4	38,4	23,7	38,4%	1290
41	4103	Cat. m.	95,5	2	49,7	40,6	18,2%	675
41	4104	Cat. m.	114,7	3	49,0	31,1	36,5%	1566
41	4105	Pal.tto	127,0	3	46,0	26,2	43,1%	1776
41	4106	Pal.tto	248,3	4	76,0	44,2	41,8%	3684
41	4107	Cat. m.	69,8	3	36,6	24,8	32,1%	992
42	4201	Pal.tto	285,9	4	72,2	21,4	70,3%	4808
42	4202	Cat. s.	87,1	5	47,1	32,4	31,2%	1524
42	4203	Cat. s.	65,2	5	39,5	29,7	24,7%	1064
42	4204	Cat. s.	41,7	5	28,5	20,2	29,2%	849
42	4205	Pal.tto	494,0	4	120,6	37,6	68,9%	9474
42	4206	Cat. s.	81,2	3	38,3	24,0	37,4%	932
42	4207	Pal.tto	295,2	3	80,1	19,6	75,6%	3025
43	4301	Pal.tto	449,0	4	128,7	43,5	66,2%	9793
43	4302	Palazzo	234,1	5	85,7	33,2	61,3%	3477
43	4303	Cat. m.	96,3	4	44,5	33,0	25,9%	1632
43	4304	Palazzo	362,7	4	99,1	46,8	52,8%	5554
43	4305	Palazzo	468,9	4	109,8	14,2	87,0%	9329
43	4306	Palazzo	234,0	4	61,3	27,8	54,7%	3979
43	4307	Cat. m.	41,0	5	26,9	20,6	23,5%	887
43	4308	Cat. m.	46,0	4	30,1	15,7	48,0%	575
43	4309	Palazzo	345,7	5	76,5	36,6	52,1%	7608
43	4310	Palazzo	201,2	5	57,1	20,5	64,0%	4196
44	4401	Pal.tto	205,4	4	68,9	16,2	76,5%	3535
44	4402	Cat. m.	109,9	2	53,4	30,9	42,1%	704
44	4403	Pal.tto	610,5	5	150,0	60,3	59,8%	11553
44	4404	Pal.tto	148,0	5	55,0	35,7	35,1%	2404
44	4405	Pal.tto	187,9	4	65,8	29,5	55,1%	2903
44	4406	Cat. s.	55,5	5	30,2	16,8	44,3%	982
45	4501	E. s. re.	3556,4	3	639,4	178,0	72,2%	52327
45	4502	Cat. m.	60,7	4	31,1	23,8	23,4%	1019
45	4517	Pal.tto	139,5	3	52,1	21,3	59,0%	1827
45	4518	Cat. m.	64,9	4	32,5	18,2	43,8%	1201
45	4519	Pal.tto	240,9	4	78,3	33,3	57,5%	3751
45	4520	Pal.tto	329,5	4	90,0	23,2	74,2%	4867
45	4523	Pal.tto	148,2	4	53,1	25,1	52,8%	2771

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]	ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
45	4525	Cat. m.	170,7	4	53,2	31,4	40,9%	2622	60	6004	Cat. s.	54,6	3	29,7	15,7	47,1%	464
45	4528	Cat. m.	74,7	4	42,3	25,0	40,8%	1168	60	6005	Cat. m.	62,5	3	38,8	21,7	44,0%	761
45	4530	Cat. m.	98,1	4	39,6	18,7	52,9%	1511	60	6006	Cat. m.	112,3	4	46,2	18,0	61,1%	1535
45	4531	Pal.tto	152,3	4	54,3	15,5	71,4%	2133	60	6007	Cat. m.	77,7	4	39,2	16,4	58,2%	1184
45	4533	Pal.tto	227,1	4	63,3	18,3	71,1%	3548	60	6008	Cat. m.	71,7	3	36,8	17,7	51,8%	954
45	4534	Cat. m.	63,9	4	35,1	24,7	29,5%	870	60	6009	Palazzo	767,1	4	146,0	23,0	84,2%	12720
45	4535	Cat. m.	73,7	4	36,7	24,8	32,5%	986	62	6203	Cat. s.	58,1	2	30,3	13,5	55,5%	325
45	4536	Cat. m.	161,5	4	50,9	24,7	51,5%	2388	62	6204	Pal.tto	257,9	2	98,8	27,4	72,3%	2302
45	4537	Cat. m.	146,3	4	58,0	24,6	57,5%	2366	62	6205	Pal.tto	200,2	2	97,2	26,1	73,2%	1748
45	4538	E. s. re.	1340,3	3	358,7	25,6	92,9%	21502	63	6301	Pal.tto	349,2	3	68,6	0,0	100,0%	4326
45	4543	Cat. m.	330,5	3	80,0	38,5	51,9%	3048	64	6401	Giarr.	399,0	4	116,1	14,6	87,4%	9199
45	4544	Cat. m.	139,0	4	50,2	39,9	20,6%	2366	64	6402	Pal.tto	287,4	5	76,3	36,0	52,8%	6012
45	4545	Cat. m.	101,8	5	47,1	26,2	44,3%	1848	64	6403	Pal.tto	481,5	5	107,5	41,8	61,1%	10343
45	4546	Pal.tto	152,7	5	51,5	22,9	55,6%	2487	64	6404	Pal. pl.	1087,5	3	164,7	37,3	77,3%	16746
45	4547	Cat. m.	102,5	3	42,4	21,3	49,8%	1486	65	6501	Giarr.	787,1	4	210,4	0,0	100,0%	19604
45	4548	Cat. s.	70,8	2	42,7	25,3	40,8%	862	66	6601	Giarr.	332,4	4	84,9	0,0	100,0%	7801
46	4601	Palazzo	2494,0	4	398,5	49,3	87,6%	37697	67	6701	Giarr.	446,4	4	102,8	0,0	100,0%	10111
46	4602	Pal.tto	290,3	4	67,6	51,4	23,9%	4140	68	6801	Giarr.	556,8	4	135,8	15,5	88,6%	11579
46	4603	Cat. m.	122,3	4	44,3	21,1	52,4%	1982	68	6802	Giarr.	233,3	4	66,7	15,5	76,8%	4759
47	4701	Palazzo	749,2	3	169,8	11,9	93,0%	12297	69	6901	E. s. re.	2424,4	4	484,0	62,5	87,1%	50256
47	4702	Pal.tto	168,9	4	71,6	11,9	83,3%	2501	70	7001	Giarr.	150,4	3	53,1	9,8	81,6%	2878
49	4901	Palazzo	1623,2	4	281,2	50,2	82,1%	25125	70	7002	Giarr.	169,9	4	53,4	21,9	58,9%	4159
49	4902	Pal.tto	268,7	5	92,7	50,8	45,2%	4983	70	7003	Giarr.	265,7	4	66,2	12,2	81,6%	5754
49	4907	Palazzo	385,7	3	83,4	8,8	89,4%	5708	71	7101	Giarr.	472,9	5	123,7	0,0	100,0%	11237
51	5101	Cat. s.	80,3	5	36,6	7,3	80,1%	1348	73	7301	Giarr.	1073,0	3	164,1	43,7	73,4%	17201
51	5102	Cat. s.	207,7	3	72,3	14,4	80,1%	2227	73	7303	Giarr.	914,2	4	76,4	38,0	50,3%	20443
51	5103	Cat. s.	143,9	3	55,2	7,1	87,2%	1919	74	7401	Giarr.	1567,4	4	320,3	0,0	100,0%	36273
53	5301	E. s. re.	3593,9	4	406,8	16,5	95,9%	79830	75	7501	Giarr.	918,9	4	186,8	39,7	78,7%	18465
54	5401	E. s. re.	1832,8	3	269,1	32,0	88,1%	29763	75	7502	Palazzo	870,5	4	183,5	39,7	78,4%	15601
54	5402	Pal.tto	198,9	4	59,4	34,8	41,5%	3652	76	7601	Giarr.	943,9	4	179,3	36,5	79,6%	24147
54	5403	Pal.tto	232,7	4	83,9	26,2	68,8%	3961	76	7602	Palazzo	429,5	4	113,2	36,7	67,5%	6763
54	5404	Pal.tto	211,2	4	62,7	20,1	68,0%	3578	76	7604	Palazzo	1124,5	3	219,4	32,2	85,3%	16405
54	5405	Pal.tto	184,7	3	62,2	19,1	69,3%	2580	76	7605	Palazzo	652,2	5	158,5	38,9	75,5%	10515
55	5501	Pal.tto	334,6	3	88,3	13,4	84,8%	4086	76	7607	Cat. m.	204,1	3	75,3	15,7	79,2%	2794
55	5502	Pal.tto	96,0	3	40,5	17,3	57,4%	1118	76	7608	Cat. m.	126,1	4	54,4	23,4	56,9%	2814
55	5503	Cat. m.	89,4	2	38,6	14,6	62,2%	760	76	7610	Cat. m.	118,2	4	56,3	18,9	66,4%	1746
55	5504	Cat. m.	116,8	2	61,2	7,1	88,4%	919	76	7611	Pal.tto	154,6	4	53,0	20,4	61,5%	2495
55	5505	Cat. m.	44,5	3	26,9	14,0	47,9%	523	76	7612	Cat. s.	16,0	3	19,6	15,0	23,7%	164
55	5506	Cat. m.	60,0	2	32,2	19,9	38,1%	570	77	7701	Palazzo	754,5	4	156,3	23,6	84,9%	13348
55	5507	Pal.tto	175,7	3	54,5	16,1	70,4%	2090	77	7702	Palazzo	335,5	3	106,1	60,4	43,0%	4776
55	5508	Pal.tto	105,9	3	45,0	12,5	72,2%	1485	77	7703	Palazzo	249,5	3	85,4	53,7	37,2%	3714
55	5509	Pal.tto	125,4	3	45,2	21,9	51,6%	1472	77	7704	Palazzo	376,6	3	103,8	44,3	57,3%	5239
56	5601	Palazzo	458,9	4	157,3	28,3	82,0%	6304	77	7707	Pal.tto	99,9	5	44,5	15,2	65,8%	1417
56	5602	Cat. s.	46,1	4	27,3	9,4	65,7%	657	78	7801	Palazzo	767,2	3	189,1	40,8	78,4%	10076
56	5603	Cat. s.	105,5	2	45,8	12,4	72,9%	766	78	7803	Pal.tto	290,4	4	82,5	16,6	79,9%	5336
56	5604	Palazzo	590,0	4	150,1	31,3	79,1%	9821	78	7804	Palazzo	256,3	5	85,0	29,2	65,6%	5281
58	5801	Pal.tto	170,0	4	70,2	14,8	78,9%	2320	78	7805	Palazzo	415,4	3	122,9	40,6	67,0%	5730
58	5802	Cat. s.	50,9	4	28,9	20,6	28,6%	781	78	7806	Giarr.	277,6	3	86	30,1	65,0%	3748
58	5803	Cat. m.	108,7	4	49,9	20,0	60,0%	1312	78	7807	Palazzo	260,4	4	98,8	57,2	42,2%	3937
58	5804	Cat. s.	123,6	4	47,0	30,9	34,1%	1666	78	7808	Cat. m.	79,0	4	41,8	27,4	34,3%	1313
58	5805	Cat. s.	37,3	3	25,0	16,1	35,7%	449	78	7810	Cat. s.	55,6	2	30,4	21,8	28,3%	446
59	5901	Palazzo	1920,1	3	318,2	0,0	100,0%	31498	78	7812	Cat. m.	82,7	4	50,8	27,9	45,2%	1223
60	6001	Cat. m.	125,5	4	47,9	18,7	61,0%	1966	78	7813	Cat. m.	79,5	4	37,0	29,3	20,7%	1103
60	6002	Cat. m.	151,3	4	53,1	21,2	60,0%	2141	78	7814	Cat. m.	83,6	3	39,4	16,4	58,5%	1072
60	6003	Pal.tto	296,8	4	88,1	40,2	54,4%	4374	78	7815	Cat. m.	88,5	4	41,6	23,3	44,0%	1292

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
78	7816	Cat. m.	157,5	4	54,5	29,7	45,6%	2440
78	7817	Pal.tto	176,4	3	95,4	66,2	30,6%	2857
79	7901	E. s. re.	1222,0	3	465,9	159,8	65,7%	15254
79	7904	Pal.tto	88,3	2	44,2	23,1	47,8%	609
79	7905	Pal.tto	344,8	3	85,2	29,4	65,5%	3691
79	7906	Pal.tto	410,8	3	111,1	16,1	85,5%	5725
79	7908	Cat. m.	139,7	4	50,0	35,8	28,4%	2319
79	7909	Pal.tto	194,7	4	87,8	49,9	43,2%	2822
79	7910	Cat. m.	100,3	3	43,0	20,5	52,3%	1340
79	7911	Cat. m.	120,1	3	47,1	17,2	63,6%	1602
79	7913	Cat. m.	113,1	2	46,1	27,9	39,4%	998
79	7914	Cat. m.	154,9	3	52,8	26,8	49,3%	1550
79	7915	E. s. re.	501,8	4	97,6	29,5	69,8%	9310
79	7917	Palazzo	721,5	3	204,4	61,2	70,1%	9821
79	7919	Palazzo	293,0	3	108,5	47,7	56,0%	3550
79	7920	Pal.tto	247,6	3	65,4	39,3	39,8%	3228
79	7921	Cat. s.	50,3	3	28,7	21,0	26,7%	519
80	8001	Cat. m.	198,6	2	63,6	6,0	90,6%	1335
80	8002	Pal. pl.	159,4	3	59,5	6,0	90,0%	1418
80	8003	Cat. m.	110,0	4	43,0	15,3	64,4%	1283
80	8004	Cat. m.	153,3	3	70,3	15,3	78,3%	1991
81	8101	Pal.tto	193,3	3	55,9	14,2	74,7%	2262
81	8102	Pal.tto	136,8	4	47,3	14,2	70,1%	2034
82	8201	Pal.tto	143,5	5	49,6	11,1	77,7%	2227
82	8202	Pal.tto	128,6	4	61,8	32,6	47,2%	1572
82	8203	Pal.tto	188,2	2	58,0	24,5	57,7%	1965
83	8301	Cat. s.	40,9	4	25,6	11,4	55,6%	540
83	8302	Cat. m.	117,4	3	51,8	32,7	36,8%	1354
83	8303	Cat. s.	68,8	5	40,2	16,1	59,9%	1037
83	8304	Cat. s.	59,9	4	34,1	15,3	55,0%	914
83	8305	Cat. m.	97,3	3	39,8	25,7	35,5%	1092
83	8306	Palazzo	566,0	4	172,0	69,3	59,7%	7566
83	8307	Pal.tto	201,2	4	60,5	19,7	67,4%	2927
83	8308	Cat. s.	78,4	3	36,9	18,4	50,0%	765
83	8309	Cat. s.	22,5	2	19,1	14,7	22,8%	142
84	8401	Palazzo	586,2	4	134,4	6,5	95,1%	8866
84	8402	Pal.tto	208,4	4	64,5	17,9	72,2%	3204
84	8403	Cat. m.	122,2	3	47,0	21,3	54,7%	1422
84	8404	Cat. m.	201,2	3	67,1	29,4	56,2%	2716
85	8501	Cat. m.	118,4	4	44,1	9,6	78,2%	1664
85	8502	Cat. m.	61,9	5	32,1	19,2	40,3%	869
86	8601	Pal.tto	463,5	4	120,1	36,1	69,9%	7834
86	8602	Palazzo	579,2	3	142,1	38,7	72,8%	6957
86	8603	Pal.tto	265,3	3	84,0	32,4	61,4%	3424
87	8701	Pal.tto	393,7	4	112,1	28,6	74,5%	6017
87	8702	Cat. m.	89,0	3	46,3	31,6	31,7%	923
87	8703	Cat. m.	124,6	4	44,8	23,5	47,6%	1774
87	8704	Cat. m.	47,0	3	29,1	24,4	16,1%	489
87	8705	Cat. m.	46,2	3	29,1	24,4	16,2%	511
87	8706	Cat. s.	49,1	3	30,8	21,3	31,1%	500
87	8707	Cat. m.	163,0	4	54,0	35,3	34,5%	2347
87	8708	Cat. m.	109,5	5	58,4	21,2	63,7%	2060
87	8709	Cat. m.	63,3	5	44,3	37,7	14,9%	1352
87	8710	Pal.tto	255,1	3	73,2	45,2	38,2%	3549
87	8711	Palazzo	624,0	4	149,5	42,3	71,7%	9175

ISOLATO	UNITÀ EDILIZIA	TIPOLOGIA DAL P.P.E.	AREA DI SEDIME [m ²]	NUMERO DI PIANI	PERIMETRO DI BASE TOTALE [m]	PERIMETRO DI BASE CONDIVISO [m]	FRAZIONE LIBERA DEL PERIMETRO DI BASE	VOLUME [m ³]
88	8801	Pal.tto	308,9	3	101,1	18,0	82,2%	3191
88	8802	Cat. s.	40,4	3	25,5	19,4	24,0%	412
88	8803	Cat. s.	80,3	3	36,5	26,0	28,8%	815
88	8804	Palazzo	367,6	3	107,8	38,6	64,2%	4608
88	8805	Pal.tto	349,8	4	83,5	35,5	57,5%	5697
88	8806	Cat. s.	65,8	3	34,2	17,5	49,0%	803
88	8807	Cat. m.	233,5	4	88,0	23,7	73,1%	3762
88	8808	Pal.tto	311,4	4	88,8	32,8	63,1%	6405
89	8901	Cat. s.	47,4	3	27,7	13,9	50,0%	533
89	8902	Pal.tto	393,5	5	89,6	34,5	61,5%	6942
89	8903	Cat. s.	116,1	3	46,7	27,2	41,7%	1327
89	8904	Pal.tto	112,5	3	49,2	28,3	42,5%	1514
89	8905	Pal.tto	78,9	4	35,3	17,4	50,8%	1274
89	8906	Cat. s.	54,3	3	30,6	21,1	30,9%	707
90	9001	Cat. m.	162,1	5	56,2	14,2	74,7%	2674
90	9002	Cat. s.	134,2	4	50,1	24,1	51,8%	2094
90	9003	Pal.tto	146,2	4	53,2	35,0	34,1%	1893
90	9004	Pal.tto	117,4	4	49,6	26,3	47,0%	1742
90	9005	Palazzo	243,3	4	80,5	13,6	83,1%	4000
91	9101	Palazzo	525,9	3	98,5	0,0	100,0%	8695
92	9201	Cat. s.	102,0	3	42,6	21,5	49,5%	1383
92	9202	Cat. s.	60,4	4	31,1	23,3	25,2%	940
92	9203	Cat. s.	37,0	3	24,9	20,0	20,0%	414
92	9205	Cat. s.	85,9	3	38,4	19,4	49,5%	872
92	9206	Cat. s.	104,5	2	43,6	21,6	50,4%	859
93	9301	Cat. m.	101,5	4	43,0	12,2	71,7%	1546
93	9302	Cat. m.	88,4	4	39,8	22,9	42,6%	1410
93	9303	Cat. s.	39,6	4	25,3	13,0	48,6%	559
93	9304	Cat. s.	38,4	4	25,4	20,1	20,6%	591
94	9401	Pal.tto	177,9	4	53,5	12,2	77,1%	3083
94	9402	Cat. s.	38,5	3	24,8	5,9	76,1%	424
95	9501	Pal.tto	240,5	4	69,8	22,6	67,7%	4117
95	9502	Cat. s.	43,8	3	26,9	21,3	20,9%	517
95	9503	Cat. s.	29,1	2	23,1	17,4	24,5%	239
95	9505	Cat. s.	89,5	3	39,8	26,8	32,8%	808
96	9601	Cat. s.	80,5	5	38,5	19,5	49,3%	1427
96	9602	Cat. s.	26,6	5	24,1	19,8	17,8%	568
96	9603	Cat. s.	63,4	4	32,2	23,6	26,7%	776
96	9604	Cat. s.	82,5	4	40,7	24,2	40,6%	1104
96	9605	Pal. pl.	216,6	4	74,7	29,4	60,7%	3249
96	9606	Cat. m.	161,4	4	56,6	28,5	49,7%	2447
97	9701	Cat. m.	59,8	4	31,7	16,0	49,4%	855
97	9702	Cat. s.	77,3	3	41,3	20,0	51,6%	852
98	9801	Pal.tto	226,3	4	65,5	0,0	100,0%	4098
99	9901	Pal.tto	87,0	4	40,8	13,0	68,2%	1452
99	9903	Giarr.	287,9	4	84,0	8,2	90,2%	4981
100	10001	Palazzo	519,9	3	98,8	20,0	79,8%	7012
100	10002	Cat. m.	183,0	4	64,0	20,0	68,8%	3250
104	10401	Pal.tto	172,6	4	62,2	22,8	63,4%	2619
104	10402	Cat. m.	51,5	2	31,0	24,8	20,1%	465
104	10403	Cat. m.	86,9	3	62,0	31,9	48,5%	1089
104	10404	Cat. m.	94,6	4	42,2	20,8	50,8%	1347
104	10405	Cat. m.	101,7	5	43,0	20,0	53,4%	1764
104	10406	Cat. m.	173,7	3	70,6	32,9	53,4%	1909
105	10501	E. s. re.	757,0	4	179,8	12,9	92,8%	14232

6.4.2 Proposta di categorie edilizie

La descrizione per categorie che si propone non è pensata come alternativa alla struttura tipologica del P.P.E. ma, rivisitandola, mira a correlarla ad aspetti dimensionali, morfologici e aggregativi che influenzano le prestazioni energetiche e ambientali degli edifici storici di Palermo. A tal fine non si sono analizzate le tipologie singolarmente, per articolare in un numero maggiore di gruppi. Invece, attraverso l'analisi d'insieme degli edifici del "mandamento", si sono individuati alcuni valori significativi per le caratteristiche geometriche esaminate. I gruppi così definiti sono stati raccolti, infine, in base al livello di restrizioni che la normativa impone agli interventi sul costruito storico.

Nel campione analizzato, la tipologia più frequente è quella dei "catoi multipli", che costituiscono il 37% del totale (203 edifici); i "palazzetti" formano il 26% del campione, mentre i "catoi semplici" e i "palazzi", rispettivamente, il 17% e il 15%. Solo tre sono i "palazzetti plurifamiliari" e molto contenuto è anche il numero di costruzioni "conseguenti al piano regolatore Giarrusso" (3%) e di "edifici speciali" civili e religiosi, che formano il 2% del totale. Dal punto di vista volumetrico, invece, l'incidenza di queste ultime tipologie è pari rispettivamente al 9% e al 15%; i "catoi semplici", nonostante siano numerosi, rappresentano appena il 3% del volume, i "catoi multipli" il 14% e i "palazzetti" il 22%; il peso più rilevante compete ai "palazzi", che comprendono il 36% della volumetria del campione. Da queste informazioni puramente statistiche possono trarsi alcune indicazioni: sebbene i consumi energetici non dipendano soltanto dalla consistenza degli edifici ma anche dalla funzione cui sono destinati e dalla frequenza dell'utilizzo, è chiaro tuttavia come un reale miglioramento delle prestazioni del costruito storico non possa eludere il coinvolgimento dell'architettura monumentale.

Si è già notato che non è possibile correlare la consistenza degli edifici storici di Pa-

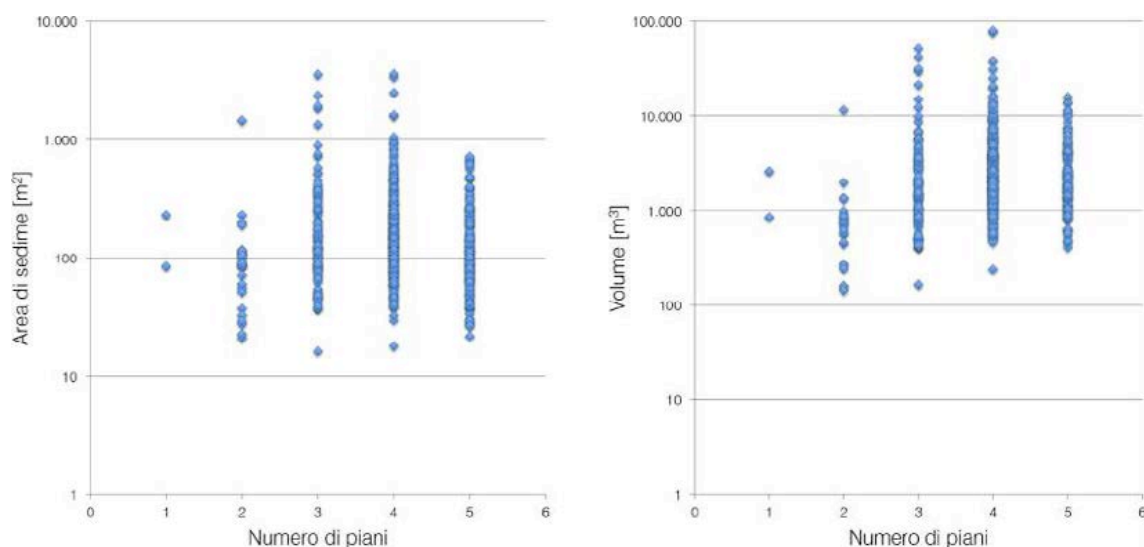


Figure 6.18 e 6.19. Area di sedime e volume degli edifici del "mandamento" Castellammare in funzione del numero di elevazioni prevalente secondo le indicazioni del P.P.E.

lermo al numero di elevazioni. Pur associando a ogni unità edilizia il numero di piani che in essa prevale, nei gruppi individuati gli intervalli di variazione del volume, così come dell'area di sedime, sono molto ampi e spesso pressoché coincidenti (figg. 6.18 e 6.19).

Dal punto di vista volumetrico, invece, un confronto fra le tipologie del P.P.E. consente

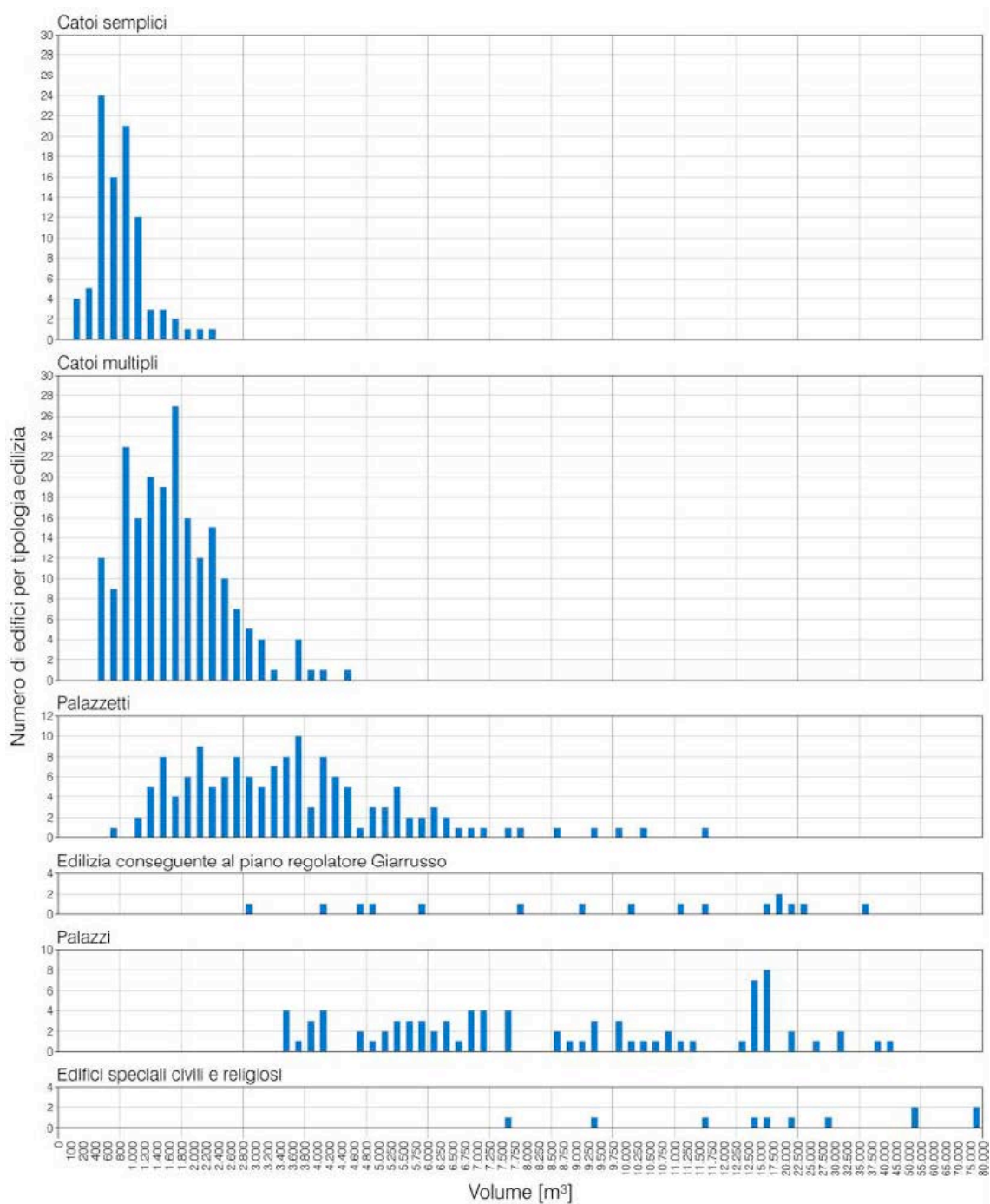


Figura 6.20. Distribuzione, sulla base della consistenza espressa in volume, degli edifici del campione distinti per tipologia edilizia (P.P.E.).

di individuare alcuni valori significativi. Guardando ai singoli gruppi, il volume dei “catoi semplici” è compreso fra circa 200 e 2.400 m³ e si concentra soprattutto fra i 400 e i 1.200 m³¹⁴. Per i “catoi multipli”, invece, l'intervallo va da 400 e 4.600 m³ e per quattro quinti delle costruzioni si riduce fra 800 e 2.600 m³¹⁵. Più ampia è la variabilità per i “palazzetti”; il 78% non supera i 4.500 m³, mentre il limite inferiore può individuarsi in 1.200 m³. La parte che supera i 4.500 m³, tuttavia, costituisce il 39% della volumetria complessiva della tipologia; prevalentemente si concentra al di sotto dei 7.000 m³, ma un numero non trascurabile di costruzioni giunge sino a 10.000 m³¹⁶. La consistenza varia in misura sensibilmente maggiore per gli edifici delle altre tipologie, nelle quali molto più forte è l'influenza dei caratteri peculiari e non è possibile individuare dei valori prevalenti, anche per il numero di costruzioni, molto più esiguo rispetto alle architetture minori. Per gli edifici “conseguenti al piano regolatore Giarrusso” il volume è compreso fra 3.000 e 35.000 m³, per i “palazzi” fra 3.500 e 45.000 m³; gli “edifici speciali” raggiungono gli 80.000 m³ e solo in due casi registrano una consistenza inferiore a 10.000 m³.

Quindi, dal punto di vista dimensionale, per l'architettura elencata, cioè i “catoi semplici” e “multipli”, al di là di poche eccezioni il volume varia fra 200 m³ e 3.800 m³. Al contempo, per l'architettura maggiore, costituita da conventi, palazzi pubblici e grandi residenze private, il volume è sempre superiore a 3.400 m³. Dunque si ritiene che una soglia indicativa di 3.500 m³ distingua bene l'architettura di base da quella aulica per il campione analizzato. A cavallo fra i due gruppi si pongono, per le caratteristiche intermedie che lo stesso Piano particolareggiato gli attribuisce, i “palazzetti”, la cui consistenza, come si è notato, è pressoché sempre inferiore a 10.000 m³. Questa soglia volumetrica appare utile per mettere in evidenza soprattutto i grandi complessi monumentali, nei quali le peculiarità predominano sui caratteri tipologici, ma pure le costruzioni che delimitano il taglio della via Roma, che anche per l'epoca in cui furono realizzate si discostano dal costruito preesistente.

Inoltre alcune indicazioni derivano dalla frazione libera del perimetro di base, attraverso la quale si sono espresse le caratteristiche morfologiche e aggregative degli edifici. Proprio perché tale parametro tiene conto sinteticamente di vari aspetti, come la presenza di cortili e di altri spazi interni a cielo aperto, il numero di affacci, la forma dell'edificio, non è semplice individuare chiaramente l'influenza di ciascuno di questi. Guardando al campione nel suo insieme, però, si può notare che solo fra le architetture elencate si rintracciano costruzioni nelle quali meno di un terzo del perimetro di base è esposta all'esterno e non condivisa con le unità edilizie adiacenti. Si tratta infatti essenzialmente di edifici interclusi su tre lati, poco sviluppati lungo la fronte stradale e privi di un affaccio su cortili retrostanti. Analogamente le architetture, per lo più monumentali, che dispongono di un cortile interno hanno un perimetro libero superiore al 60% anche quando non sono disposte ad angolo o alla testa di un isolato.

I quattro valori di soglia individuati, cioè i volumi di 3.500 m³ e 10.000 m³ per la consistenza e le percentuali di perimetro libero del 33% e 60% per l'aggregazione e la morfologia, sono alla base della descrizione in categorie edilizie che si propone per il “manda-

mento” Castellammare e consentono di articolare il campione in sette gruppi di edifici. Questi sono stati ulteriormente suddivisi in base ai diversi limiti e condizioni che il P.P.E. pone agli interventi sulle tipologie. In questo modo è stato possibile ricondurre alla struttura del Piano un numero contenuto di categorie edilizie, che la specificano sotto gli aspetti aggregativo e dimensionale.

A tal fine si sono introdotti tre “livelli” di tutela, correlati alle modalità d’intervento che lo strumento urbanistico ammette per le varie tipologie. Anche nell’ottica dell’integrazione del miglioramento energetico nelle pratiche del recupero, la differenza più rilevante è quella fra la “ristrutturazione edilizia” consentita per le tipologie dell’architettura minore e il “restauro” richiesto per gli edifici aulici. Quest’ultimo, infatti, è volto a conservare l’organismo edilizio attraverso interventi unitari che ne rispettino i caratteri formali, tipologici e costruttivi. Invece la ristrutturazione, secondo le norme in vigore nella città di Palermo, contempla una parziale trasformazione della fabbrica e consente in misura maggiore di sostituire elementi costruttivi, inserirne di nuovi, modificare la distribuzione interna. In un’ottica di recupero compatibile, anche la ristrutturazione è condizionata dalla conservazione dei caratteri non solo formali ma anche materiali dell’edificio, in parte imposta dallo stesso P.P.E. attraverso le indicazioni sugli elementi distributivi e costruttivi da mantenere (cfr. par. 6.1). Il caso più significativo è quello dei “palazzetti”, che nuovamente si pongono a cavallo fra l’architettura vernacolare e quella monumentale. Come si è notato, il Piano considera la ristrutturazione edilizia idonea a questa tipologia, ma per molti edifici, individuati puntualmente, prescrive il restauro. Se raffrontata agli edifici aulici, la minor ricchezza che connota le soluzioni spaziali e gli apparati decorativi dei “palazzetti” condiziona meno gli interventi di restauro e quindi le possibilità di un incremento delle prestazioni energetiche; d’altro canto, nel caso di ristrutturazione, sono più forti le limitazioni rispetto ai “catoì”.

Per esprimere tali differenze, in questa ricerca si sono introdotti appunto tre “livelli di tutela”. Un primo, meno restrittivo, riguarda le possibilità d’intervento che caratterizzano le tipologie dell’architettura di base, cioè i “catoì semplici” e “multipli”. Un secondo si riferisce ai “palazzetti”, ai “palazzetti plurifamiliari” e all’edilizia “conseguente al piano regolatore Giarrusso” e non distingue i casi in cui il piano prescrive il restauro da quelli in cui è ammessa la ristrutturazione. Infine, un terzo “livello” è rivolto all’architettura monumentale, nella quale sono consentiti soltanto interventi di restauro.

I sette gruppi di edifici individuati in base ai caratteri aggregativi e dimensionali divengono così sedici. Non tutti, però, sono significativi per numero di costruzioni e per volumetria. In particolare, sono state trascurate le categorie che fossero poco rilevanti sotto entrambi i punti di vista. Ne è risultata una descrizione del “mandamento” Castellammare in dodici categorie edilizie, che rappresentano il 97,3% degli edifici esaminati, ovvero il 96,7% della volumetria¹⁷.

Per ogni categoria si sono determinati i valori di riferimento per l’area di sedime, il volume e il perimetro libero, calcolati come media aritmetica dei valori delle singole unità edilizie. Non si è fatto ricorso alla deviazione standard, impiegata invece da Berg (2015), perché non tutte le categorie comprendono un numero consistente di edifici. I valori medi

proposti possono essere adoperati per individuare, all'interno di ogni gruppo, uno o più edifici rappresentativi da esaminare nel dettaglio e dai quali dedurre informazioni di validità generale per tutta la categoria.

	CATEGORIA				VALORI MEDI		
	Codice	Valori di soglia	Numero	Incidenza	Area di sedime [m ²]	Volume [m ³]	Perimetro libero [%]
LIVELLO 1 (ristrutturazione) Catoi semplici Catoi multipli	1.I	≤ 3.500 m ³ Volume ≤ 33 % Per. libero	96	17,3 % edifici 3,9 % volume	64	970	24,6
	1.II	≤ 3.500 m ³ Volume 33÷60 % Per. libero	147	26,5 % edifici 9,1 % volume	101	1.488	46,4
	1.III	≤ 3.500 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	46	8,3 % edifici 3,3 % volume	120	1.710	71,5
LIVELLO 2 (ristrutturazione o restauro) Palazzetti Edilizia conseguente al piano Giurussio	2.I	≤ 3.500 m ³ Volume 33÷60 % Per. libero	35	6,3 % edifici 3,0 % volume	135	2.055	47,6
	2.II	≤ 3.500 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	41	7,4 % edifici 4,2 % volume	167	2.468	70,7
	2.III	3.500÷10.000 m ³ Volume 33÷60 % Per. libero	29	5,2 % edifici 5,8 % volume	265	4.756	50,8
	2.IV	3.500÷10.000 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	43	7,8 % edifici 9,4 % volume	297	5.242	75,4
	2.V	≥ 10.000 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	10	1,8 % edifici 7,3 % volume	834	17.571	85,9
LIVELLO 3 (restauro) Palazzi Edifici speciali civili Edifici speciali religiosi	3.I	3.500÷10.000 m ³ Volume 33÷60 % Per. libero	17	3,1 % edifici 3,9 % volume	337	5.520	51,6
	3.II	3.500÷10.000 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	36	6,5 % edifici 10,5 % volume	425	6.967	74,2
	3.III	≥ 10.000 m ³ Volume 33÷60 % Per. libero	3	0,5 % edifici 1,6 % volume	762	12.911	54,5
	3.IV	≥ 10.000 m ³ Volume ≥ 60 % Per. libero	36	6,5 % edifici 34,6 % volume	1.284	23.027	82,0

Tabella 6.2. Proposta di descrizione dell'architettura storica del "mandamento" Castellammare per mezzo di categorie edilizie.

Per le costruzioni più inclini a una descrizione tipologica l'analisi degli edifici rappresentativi può fornire indicazioni adattabili ai caratteri delle singole costruzioni. Invece alcune categorie (2.V, 3.III, 3.IV) raccolgono edifici nei quali le peculiarità prevalgono sugli aspetti ricorrenti, come dimostra la variabilità molto più ampia delle caratteristiche esaminate; in questi casi, gli edifici rappresentativi possono essere ricondotti, più propriamente, a casi di studio.

La descrizione proposta consente di analizzare in modo sistematico alcuni aspetti rilevanti che influenzano le prestazioni d'insieme degli edifici storici dal punto di vista energetico e ambientale. Tuttavia la semplificazione che introduce, utile per costruire un quadro di conoscenze generali, ne determina anche i limiti.

Le categorie edilizie sono state definite senza tener conto dello stato di conservazione degli edifici, che però ha un'influenza notevole sulle possibilità effettive di miglioramento

energetico. Ad esempio la necessità di rifacimento degli intonaci può essere l'occasione per realizzare un rivestimento termoisolante, così come la perdita degli orizzontamenti, o la necessità di sostituirli, consente di ridurre i problemi termici e igrometrici delle connessioni e i limiti geometrici alla praticabilità di alcune misure di miglioramento energetico. La necessità di agire profondamente per garantire la sicurezza strutturale degli edifici permette anche di mettere in pratica soluzioni impiantistiche altrimenti difficilmente realizzabili. Lo stato di degrado, tuttavia, è un dato variabile non correlabile alle caratteristiche geometriche, costruttive e distributive degli edifici. Ad ogni modo è possibile considerarlo esaminando, sugli edifici analizzati, ipotesi di miglioramento commisurate a interventi di recupero strutturale di diversa consistenza.

Nell'architettura storica di Palermo, inoltre, è frequente la fusione tra unità immobiliari appartenenti a costruzioni limitrofe. Questa pratica è ammessa dalla normativa attuale soprattutto per le costruzioni di base, per le quali l'accorpamento delle unità contigue è una soluzione più volte prospettata per soddisfare le esigenze attuali di qualità ambientale interna (un noto esempio è la proposta formulata per i "catoì" da Giuffrè e Carocci, 1999). Ciò influisce sulle prestazioni effettive della fabbrica e le discosta inevitabilmente dalle indicazioni desumibili, a livello generale, dall'analisi di edifici di riferimento. Il ricorso al perimetro delle unità edilizie, comunque, rispetta l'impostazione del Piano vigente. Questo prescrive che gli interventi condotti sulle unità edilizie, siano essi di manutenzione, ristrutturazione o restauro, abbiano un carattere unitario e ciò appare particolarmente utile nell'esaminare interventi sull'involucro che ne coinvolgano l'aspetto esterno.

Infine, la descrizione proposta non si riferisce a una specifica destinazione d'uso, che influenza in modo non trascurabile i consumi energetici di un edificio e anche le strategie più adatte a contenerli. Questo aspetto, ancora una volta, riguarda soprattutto gli edifici monumentali, alcuni dei quali sono suddivisi in molteplici unità abitative, altri sono sedi di uffici pubblici, altri ancora di musei. Nuovamente, uno studio approfondito di uno o più edifici rappresentativi, anche alla luce di differenti destinazioni, consentirebbe di mettere in luce le soluzioni più appropriate per ambienti di vaste proporzioni e altri di servizio, per aree d'uso continuato o intermittente, per spazi in cui prevalgano le condizioni di benessere degli occupanti e quelli in cui prediligere la conservazione dei manufatti storici.

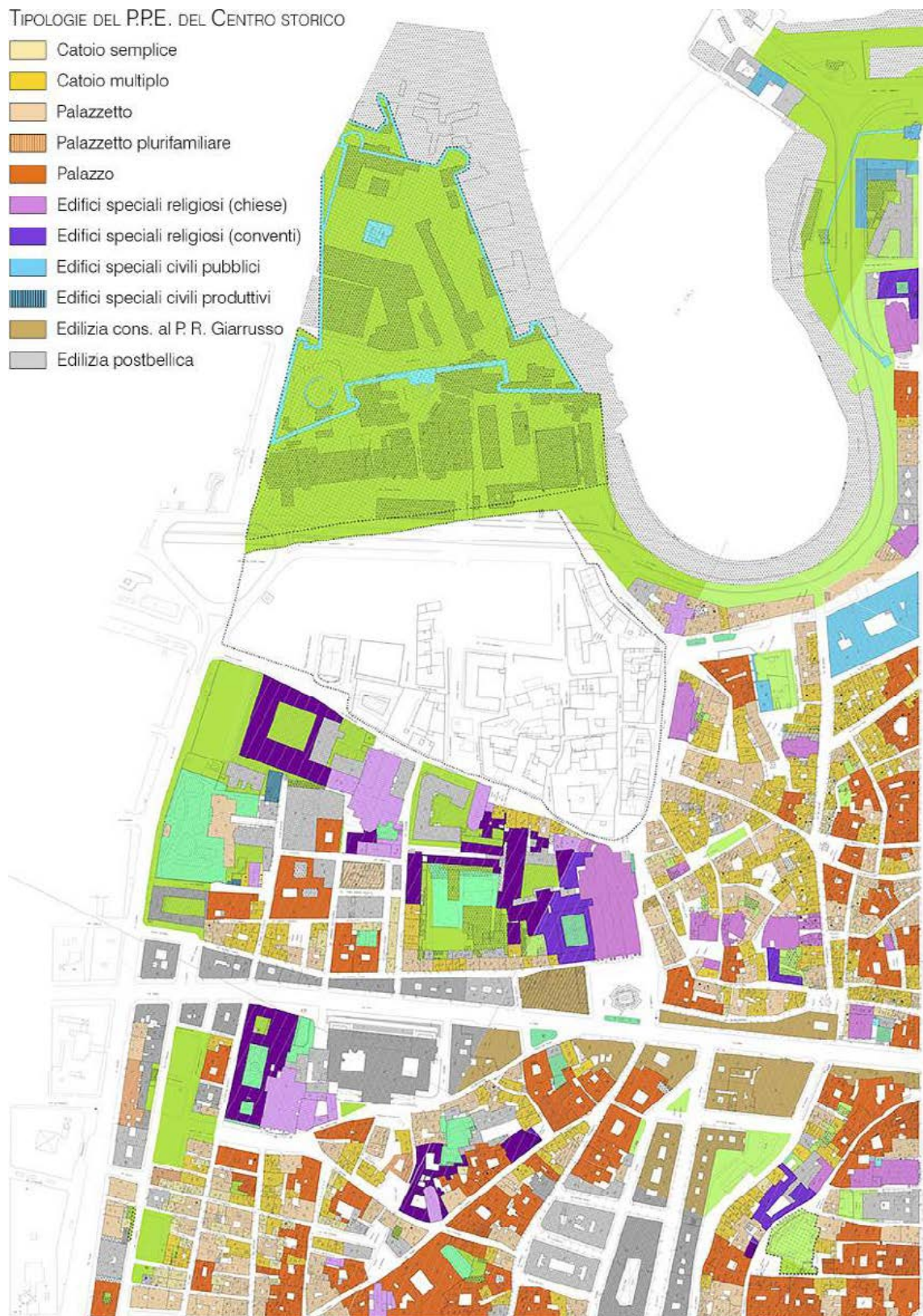


Figura 6.21. Descrizione del "mandamento" Castellammare attraverso le tipologie edilizie del Piano Particolareggiato Esecutivo del Centro storico di Palermo. Estratti dai fogli 1, 2, 5 e 6 della tavola 14 del Piano.

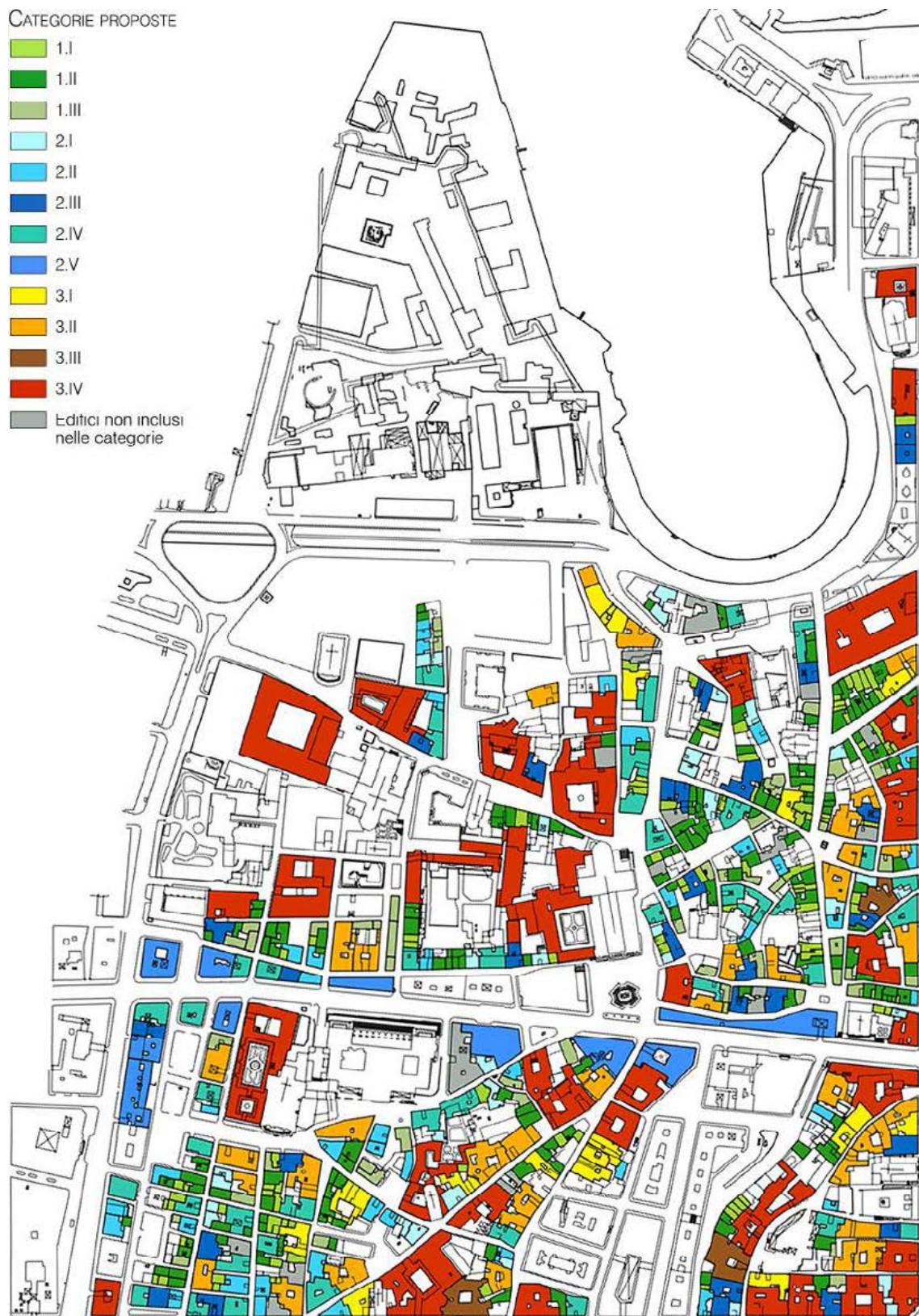


Figura 6.22. Proposta di descrizione del "mandamento" Castellammare per categorie edilizie.

Note

¹ L'elenco degli edifici siciliani vincolati come beni immobili storico-artistici e architettonici è predisposto dall'Assessorato dei Beni culturali e dell'Identità siciliana della Regione Siciliana e può essere consultato all'indirizzo www.regione.sicilia.it/beniculturali/soprintendenze/vincoli.

² Questi Piani di Recupero, elencati all'articolo 2 delle Norme Tecniche di Attuazione del P.P.E., sono: S. Agostino, Capo, Scopari, Cassaro alto, Castello S. Pietro, Albergheria, Discesa delle Capre, Montevergini.

³ Si vedano a tal proposito le Norme Tecniche di Attuazione (elaborato P3a; adeguate al D. Dir. 558/02, di rettifica del Dir124/DRU/02 di approvazione) della Variante generale al P.R.G. della Città di Palermo.

⁴ Si veda in proposito la Circolare di servizio n.1 del 6 aprile 2011 del Settore Urbanistica ed Edilizia del Comune di Palermo, "Interventi "Zone A" di P.R.G. - Obbligatorietà nullaosta Soprintendenza BB.CC.AA."

⁵ Le Norme tecniche di attuazione del "Netto Storico" costituiscono l'elaborato P3b Scheda-Norma interventi sugli immobili classificati come "Netto Storico" della Variante generale al P.R.G.

⁶ Norme di attuazione del Piano Particolareggiato esecutivo del Centro Storico di Palermo (Decreto dell'Assessorato del Territorio e dell'Ambiente del 13 luglio 1993).

⁷ Il P.P.E. annovera fra i "tipi edilizi antichi" anche la "tipologia mista", che comprende le unità edilizie contenenti più tipologie. Nella descrizione per categorie che di seguito si propone, gli edifici del "mandamento" Castellammare che fanno parte di questo gruppo sono stati ricondotti alla tipologia in essi prevalente.

⁸ Le Norme tecniche di attuazione del "Netto Storico" distinguono innanzitutto edilizia residenziale e non residenziale. La seconda comprende "edifici per la pubblica amministrazione", "edifici ad uso culturale, per lo spettacolo", "edifici produttivi", "ospedali", "manufatti isolati", "edifici di culto, religiosi e assistenziali", "scuole, istituti di istruzione secondaria, Università", "alberghi e impianti turistici", "vasche". La prima distingue invece quattro categorie: "villa, baglio, casena, masseria, palazzo", "edilizia in linea", "edilizia rurale e a schiera di borgata", "villini".

⁹ All'articolo 20 delle Norme tecniche di attuazione per il "Netto storico" si legge che l'edilizia in linea "è caratterizzata da sistemi insediativi che si sono prevalentemente sviluppati nel tessuto dell'espansione ottocentesca. Costituiscono una maglia regolare di isolati ad elevato rapporto di copertura, delimitati sui quattro fronti da cortine edilizie separate tra loro da esigue intercapedini, cortili, passaggi, etc. su cui affacciano i retrospetti. Sono generalmente caratterizzati da un impianto distributivo plurifamiliare articolato su un androne e un corpo scala unico con più di una unità abitativa per piano. Spesso il piano terra è rialzato per consentire l'uso residenziale della prima elevazione fuori terra e conseguentemente esistono locali seminterrati. In alcuni casi gli immobili presentano pertinenze scoperte sul fronte stradale anche con sistemazioni a verde. Il numero delle elevazioni fuori terra è variabile".

¹⁰ La definizione di questa tipologia è riportata all'articolo 21 delle Norme tecniche di attuazione per il "Netto storico", ove si afferma che essa "è caratterizzata da sistemi insediativi lineari a margine della viabilità di collegamento tra aree periferiche e centro urbano e comprende unità unifamiliari o plurifamiliari; quando si sviluppa su più elevazioni è dotata di scala autonoma. Solo eccezionalmente si presentano complessi edilizi unitari costituiti da una serie di alloggi in aderenza. La superficie coperta di ciascuna unità consiste o di un unico ambiente negli episodi più elementari, o da suoi multipli disposti lateralmente o posteriormente, nelle forme più evolute. Le unità edilizie sono costituite mediamente da due a quattro elevazioni fuori terra".

¹¹ Si evidenzia la recente approvazione in Sicilia della Legge regionale n.13 del 10 luglio 2015, "Norme per favorire il recupero del patrimonio edilizio di base dei centri storici".

¹² Basti pensare alla pratica, storicamente molto diffusa, di ricavare dei piani ("mezzanini") sfruttando la maggior altezza del piano terra, oppure all'integrazione fra piani di servizio e grandi spazi di rappresentanza nelle dimore aristocratiche.

¹³ Come per l'area di sedime, gli eventuali spazi esterni coperti sono inclusi nella costruzione se sovrastati da ambienti chiusi e, quindi, potenzialmente climatizzati.

¹⁴ Solo quattro costruzioni hanno volume inferiore a 200 m³, fra 140 e 165 m³.

¹⁵ Di 203 "catoi multipli", solo 21 hanno volume inferiore a 800 m³ e 24 superiore a 2.600 m³; fra questi, superano i 3.400 m³ solo sette edifici, dei quali due si spingono oltre i 4.000 m³.

¹⁶ Nel campione analizzato solo un edificio ha un volume superiore a 11.000 m³. Si è registrato inoltre un

volume di 16.000 m³ per un "Palazzetto plurifamiliare". Si tratta comunque di un edificio sul perimetro esterno del mandamento, in via Cavour, costruito dopo l'abbattimento delle mura e quindi comprensibilmente diverso dai fabbricati precedenti.

¹⁷ Nei quattro gruppi esclusi perché poco significativi in termini di volumetria e numero di edifici rientrano le costruzioni identificate con i codici 1205, 2002, 2007, 2801, 2911, 3101, 3206, 3802, 4015, 4302, 4403, 4602, 7303, 7817, 8807. Questi sono stati indicati in figura 6.22 con colore grigio.

Bibliografia

Ambrogio, K., & Zuppiroli, M. (2013). *Energia e restauro: Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali*. Milano: Franco Angeli.

Ascione, F., De Masi, R. F., De Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M., & Vanoli, G. P. (2013). Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities*, 35, 270-283.

Ballarini, I., Corgnati, S. P., Corrado, V. (2014). Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, 68, 275-284.

BATAN. (2011). *Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948. Rapport de Synthèse. Février 2011*. BATAN. Da http://www.est.cerema.fr/IMG/pdf/BATAN_Rapport_synth_se_2011_cle2e82f1.pdf.

Berg, F. (2015). *Categorising a historic building stock - An interdisciplinary approach* (Master Thesis in Integrated Conservation). Uppsala University, Uppsala, Svezia.

Boarin, P. & Davoli, P. (2013). A Systemic Approach for Preliminary Proposals of Sustainable Retrofit in Historic Settlements. The Case Study of Villages Hit by Earthquake. In *The European Conference on Sustainability, Energy and Environment 2013: Official Conference Proceedings. Convegno tenuto a Brighton, Regno Unito, 4-7 luglio 2013*. Giappone: IAFOR.

Booth, A. T., Choudhary, R., & Spiegelhalter, D. J. (2012). Handling uncertainty in housing stock models. *Building and Environment*, 48, 35-47.

Broström, T., Bernardi, A., Egusquiza, A.R., Frick, J., & Kahn, M. (2013). A method for categorization of European historic districts and a multiscale data model for the assessment of energy interventions. In A. Troi, & E. Lucchi (a cura di), *Cultural Heritage Preservation EWCHP 2013: Proceedings of the 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Convegno tenuto a Bolzano, 16-18 Settembre 2013* (pp 153-158). Milano: Felix Verlag editrice.

Broström, T., Eriksson, P., Liu, L., Rohdin, P., Ståhl, F., & Moshfegh, B. (2014). A Method to Assess the Potential for and Consequences of Energy Retrofits in Swedish Historic Buildings. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5(2), 150-166.

CCEM (Competence Center Energy and Mobility). (2009). *Annual Activity Report 2009*. CCEM. Da http://www.ccem.ch/MediaBoard/CCEM_Annual_Activity_Report_2009.pdf.

Corrado, V., Ballarini, I., & Corgnati, S. P. (2014). Building Typology Brochure - Italy: Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana. TABULA, EPISCOPE. Da http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/IT_TABULA_TypologyBrochure_POLITO.pdf.

DGUHC, CETE de l'EST, DGCB-LASH, & MPF. (2007). *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie. Rapport de synthèse. Aout 2007*. DGUHC, CETE de l'EST, DGCB-LASH, MPF. Da: http://www.est.cerema.fr/IMG/pdf/Rapport_Connaissance_b_oti_ancien_2007_cle5acf46.pdf

EFFESUS. (2013). *Deliverable D1.4: Database of the structured categorisation method for historic European building stock*. EFFESUS.

Eriksson, P., Hermann, C., Hrabovszky-Horváth, S., & Rodwell, D. (2014). EFFESUS Methodology for Assessing the Impacts of Energy-Related Retrofit Measures on Heritage Significance. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5 (2), 132-149.

Fabbri, K., Zuppiroli, M., & Ambrogio, K. (2012). Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools. *Energy and Buildings*, 48, 137-145.

Giovanetti F. (a cura di). (1997). *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Palermo: Flaccovio Editore.

Giuffrè, A., & Carocci, C. (1999). *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Roma-Bari: Editori Laterza.

Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stefanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683-1697.

Lombardo, G., & Cicero, C. (2014). Analysis of seismic vulnerability for urban centres. *International Journal of Design Sciences and Technology*, 21(1), 39-58.

Lucchi, E., & Pracchi, V. (a cura di). (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*. Santarcangelo di Romagna, Rimini: Maggioli Editore.

Maile, T., Bazjanac, V., & Fischer, M. (2012). A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance. *Building and Environment*, 56, 241-251.

Mata, É., Sasic Kalagasidis, A. S., Johnsson, F. (2014). Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. *Building and Environment*, 81, 270-282.

Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., & Strykowski, W. (2014). Materials composition or energy characteristic - What is more important in environmental life cycle of buildings? *Building and Environment*, 72, 15-27.

Sanapo, M. (2001). I centri storici come beni culturali: un percorso difficile. *Aedon*, 2. Da <http://www.aedon.mulino.it/archivio/2001/2/sanapo.htm>.

Reinhart, C.F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196-202. Disponibile in rete dal 2 dicembre 2015.

TABULA Project Team. (2012). *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project. Final Project Report*. TABULA. Da http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/report/TABULA_FinalReport.pdf.

Videtta, C. (2012). I centri storici al crocevia tra disciplina dei beni culturali, disciplina del paesaggio e urbanistica: profili critici. *Aedon*, 3. Da <http://www.aedon.mulino.it/archivio/2012/3/videtta.htm>.

CAPITOLO 7

Ipotesi di miglioramento energetico per edifici rappresentativi dell'architettura storica di Palermo

Scenarios for the energy improvement of representative historic buildings in Palermo

ABSTRACT - *On the base of the categorisation proposed for the historic centre of Palermo and the quantitative values ascribed to their features, three residential buildings have been examined as representative for their respective categories. Their current energy performance and the potential improvement are analysed by means of software simulations. This final part of the study is an application of the methodology proposed in the research and aims at highlighting its limits and potentialities. The urban plan P.P.E. Centro storico describes two of the selected buildings as catoi, vernacular constructions of Palermo's historic architecture. For them the plan allows renovation, which includes eventual changes for significant elements such as roof and staircase. Even in a conservative perspective, the simplicity of inner space solutions and the shortage of decorations enlarge the chances for energy improvement. The main difference between the two selected buildings consists of their relation to the adjoining buildings. The first is surrounded on three sides and only one faces the outer space (S-W). In the second, bigger in size, two façades are free and look onto opposite streets (N-W and S-E). Finally, the first building is supposed to be used as a single-family house while the second is divided in two dwellings on different storeys. The urban plan includes the third building among palazzetti, which are connoted by features similar to aristocratic architectures but on a minor scale. The conservation of distribution elements, as the recurring system of entrance and courtyard, is requested but renovation is generally allowed. For a part of these buildings, including the simulated one, the plan requires restoration. Nevertheless, it implies less strict limits than for monumental buildings, since the less refined architectural language of palazzetti. On the opposite, when renovation is permitted the potential energy improvement is reduced in comparison to catoi. The building selection, addressed by the average values defined for each category, has been influenced by the availability of technical drawings and information. An indoor survey has not been possible and therefore the models are not verified by calibration. The thermal simulations have been carried out by means of the software WUFI Plus. Based on the hypothesis of a current condition of maintenance, three*

scenarios have been analysed for each model. The first focuses on the current building performance and its passive behaviour. Together with the effect of the massive structure, it examines notably the role of natural ventilation and traditional shading devices in the reduction of summer overheating. The second and the third scenarios simulate energy retrofit suitable to the building protection. The actions supposed in the former can be easily integrated with the current restoration practices. Quite widespread to some extent, they include the insulation of roof and ground floor and the improvement of existing windows in terms of thermal transmittance and air infiltration. The results show a significant reduction of energy demand, mainly in the heating period because the prevalent incidence of natural ventilation during the cooling season. In the third scenario a more consistent energy improvement is simulated, consisting of a reflecting coating for the roof covering and the thermal insulation of envelope walls. About the latter, the effects of both inner and outer insulated plaster are examined, while the application of thick layers is considered compatible only on the indoor wall surface. The simulation results are expressed as reduction of heating and cooling demand to express energy savings, while the duration of thermal discomfort is calculated as the number of hours during which inner (and operative) temperature is below 20°C or overcomes 26°C.

In base alla descrizione per categorie edilizie proposta per il centro storico di Palermo, si sono scelte tre costruzioni che, per le loro dimensioni e modalità aggregative, possano ritenersi rappresentative di altrettante categorie in riferimento a queste caratteristiche. Due sono descritte dal P.P.E. come "catoì", una come "palazzetto". I tre edifici sono stati oggetto di simulazioni termiche in regime dinamico, svolte con il programma *WUFI Plus* presso il *Fraunhofer-Institut für Bauphysik* di Holzkirchen. Esse sono volte a verificare la metodologia seguita nello studio, fondata sul riferimento ai caratteri ricorrenti del costruito storico di Palermo, e a mettere in luce i limiti e le potenzialità di questa nel definire un quadro generale di conoscenze sulle prestazioni energetiche e sulle possibilità di miglioramento compatibile del patrimonio analizzato.

Per ciascun edificio si sono esaminate le possibilità di migliorare le prestazioni termiche dell'involucro secondo due ipotesi principali; da un lato si sono considerati interventi facilmente integrabili nelle pratiche attuali del recupero edilizio o in esso già diffuse, dall'altro si è supposto di ricorrere a misure più consistenti ma maggiormente condizionate dalla conservazione dei caratteri formali e materiali della fabbrica. Gli effetti di tali interventi sono valutati in termini di benessere termico e di fabbisogno energetico per la climatizzazione.

Le simulazioni sono svolte adoperando per i componenti tecnici soluzioni costruttive diffuse nella tradizione dell'edilizia storica palermitana (Giovanetti, 1997) e assumendo per i tre edifici uno stato ordinario di manutenzione. Infatti l'impossibilità di accedere a tutti gli spazi interni ha precluso l'approfondimento puntuale dei caratteri costruttivi, l'esecuzione di indagini strumentali in merito alle prestazioni termiche dei principali componenti, lo svolgimento di un monitoraggio per la verifica dei modelli. Al contrario, il riferimento ai caratteri peculiari dei singoli edifici, che appare discordante rispetto all'approccio seguito, consentirebbe di tenere in maggior conto le specificità di ogni costruzione che influenzano la scelta degli interventi e ne limitano l'applicazione.

La qualità ambientale interna di un edificio, e quindi le sue prestazioni energetiche, non possono prescindere dall'efficienza degli impianti e dall'interazione fra questi e l'involucro edilizio. Hanno un'incidenza rilevante sui consumi energetici, accanto al sistema di climatizzazione, anche quelli per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'illuminazione artificiale. Per quest'ultima, in particolare, i consumi non dipendono soltanto dalla scelta dei dispositivi ma anche dalle caratteristiche geometriche e aggregative degli edifici: basti pensare alla scarsa qualità luminosa dei piani bassi del centro storico di Palermo, nel quale, come in molte città mediterranee, il fitto tessuto urbano favorisce invece, attraverso la protezione dai raggi solari, il raffrescamento degli ambienti interni.

Le simulazioni di seguito esposte non approfondiscono questi aspetti, seppur rilevanti, per concentrarsi sul ruolo e sul potenziale miglioramento dell'involucro nel definire le prestazioni energetiche dell'edificio e le condizioni termiche al suo interno. A tal fine si fa riferimento a un impianto ideale di climatizzazione. Inoltre non si entra nel dettaglio del rapporto fra i costi degli interventi e i relativi benefici né delle possibilità che l'effettivo stato di conservazione degli edifici consentono per il miglioramento delle loro prestazioni.

Nondimeno le simulazioni svolte, oltre a fornire informazioni indicative sui miglioramenti prestazionali conseguibili nei tre edifici, soprattutto consentono di mettere in evidenza alcune differenze nelle modalità di sfruttamento della ventilazione naturale, nelle possibilità d'isolamento delle pareti, negli effetti di interventi sull'involucro volti a mitigare il surriscaldamento estivo. Del metodo seguito nella ricerca, legato ai caratteri del costruito storico ricorrenti in ambito locale, le simulazioni che si espongono mettono dunque in evidenza, accanto ad alcuni limiti, anche le potenzialità nel definire un quadro generale di conoscenze e indicazioni, che indirizzino il miglioramento energetico del patrimonio edilizio indagato.

7.1 Scelta di architetture rappresentative di tre categorie edilizie

La scelta dei tre edifici esaminati si basa sui valori medi che, per ogni categoria edilizia, si sono adoperati per descriverne la consistenza e i caratteri aggregativi (cfr. tab. 6.2). Nel rispetto di questo criterio, per l'impossibilità di accesso interno alle costruzioni la scelta è stata indirizzata anche dalla disponibilità di rilievi geometrici, desunti dai progetti degli interventi di recupero o ricavati da pubblicazioni (Giuffrè e Carocci, 1999 e Di Benedetto, 2000). Le informazioni metriche sono state integrate, per la rappresentazione degli edifici circostanti, con quelle contenute nella Carta tecnica (scala 1:500, 1982).

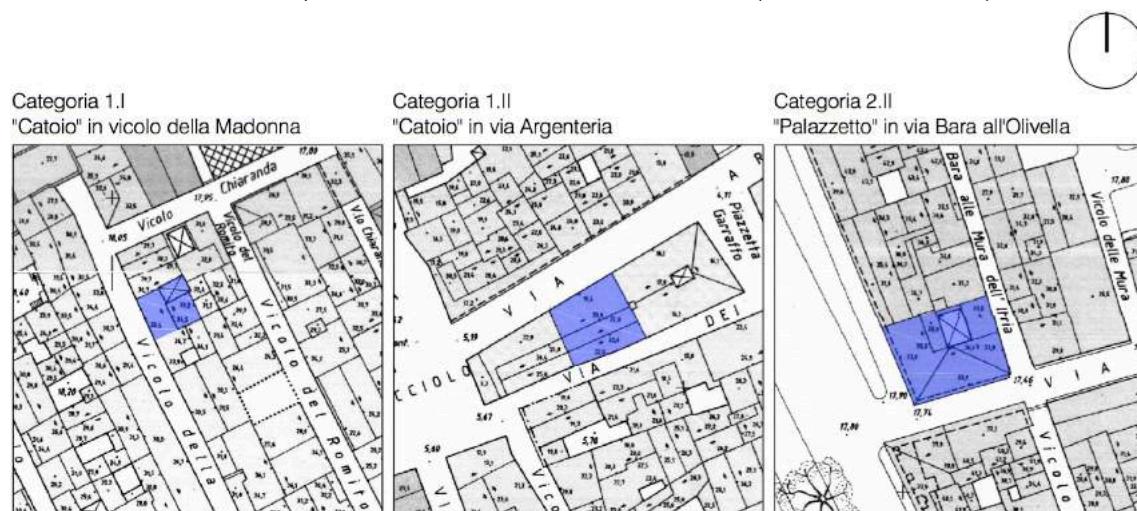


Figura 7.1. Individuazione degli edifici analizzati su estratti della Carta tecnica (1982).

Le categorie edilizie indagate sono quelle indicate come 1.I, 1.II e 2.II (cfr. 6.4.2). Le costruzioni selezionate per i primi due gruppi sono descritte dal P.P.E. del Centro storico come "catoï semplici". Per questi, come già evidenziato (cfr. 6.1), le norme d'attuazione del piano prevedono la ristrutturazione edilizia, consentono di riorganizzare le coperture, di modificare la distribuzione interna e i collegamenti verticali. Per la categoria 2.II si è scelto invece un "palazzetto"; anche per questa tipologia edilizia il P.P.E. ammette in genere la ristrutturazione e permette di modificare le quote di coperture, ma richiede di conservare il sistema distributivo di androne e cortile, la posizione della scala principale, i prospetti su spazi pubblici. Il "palazzetto" considerato rientra però fra i casi per i quali il

piano prescrive il restauro architettonico. Ciò permette un confronto più chiaro con le altre due architetture esaminate, nelle quali sono minori i limiti alle possibilità d'intervento.

Per la categoria 1.I, nella quale rientrano edifici il cui volume non superi i 3.500 m³ e la cui frazione di perimetro condiviso sia maggiore di due terzi, si analizza un "catoio semplice" in vicolo della Madonna, nel mandamento Palazzo Reale, il cui rilievo è riportato da Giuffrè e Carocci (1999). La costruzione, che si sviluppa su quattro elevazioni, ha un'area di sedime di 42 m², un volume di 690 m³ e una percentuale di perimetro libero del 23%¹; circondata da costruzioni di simile altezza, confina con gli edifici adiacenti su tre lati mentre la fronte libera, esposta a sud-ovest, si apre su una strada larga circa 3,5 m.

Nel mandamento Castellammare rientra invece il "catoio multiplo" scelto per rappresentare la categoria 1.II. Anch'essa comprende costruzioni di volume inferiore a 3.500 m³, ma con una frazione di perimetro condiviso al di sotto del 40%. L'edificio, il cui rilievo geometrico è pubblicato da Di Benedetto (2000), ha cinque elevazioni, un'area di sedime di 99 m², un volume di 1.660 m³ e una percentuale di perimetro libero del 53%. Diversamente dalla costruzione analizzata per il gruppo 1.I, questa è suddivisa in due unità abitative sovrapposte, articolata ciascuna su due elevazioni (il piano terra è parzialmente occupato da esercizi commerciali). Di conseguenza si limitano le possibilità di ricorrere al vano scala comune per la ventilazione naturale degli ambienti. L'edificio, però, a differenza del "catoio" di vicolo della Madonna, dispone di due fronti libere e contrapposte. La prima, che si apre su via Argenteria (strada larga circa 6 m), è esposta a nord-ovest, mentre la seconda, sulla stretta via dei Frangiai (larga appena 2,3 m), guarda a sud-est. Anche in questo caso, l'altezza delle costruzioni limitrofe è piuttosto omogenea e paragonabile a quella dell'edificio analizzato.

La categoria 2.II ha gli stessi limiti dimensionali della 1.II, dalla quale si distingue per l'aspetto aggregativo e per un maggior condizionamento delle esigenze di conservazione sulle possibilità d'incremento delle prestazioni energetiche. La costruzione che si esamina, della quale è stato possibile consultare elaborati di rilievo e progetto, solo parzialmente pubblicati da Di Benedetto (2000), è posta alla testa di un isolato ricadente in una delle addizioni cinquecentesche che, nel centro storico, è possibile rintracciare nei pressi dell'antica cinta muraria. L'edificio ha dunque tre fronti libere, prospicienti la prima via Maqueda in corrispondenza di piazza Verdi, la seconda via Bara all'Olivella (larga circa 5,5 m), la terza il vicolo Bara alle Mura dell'Itria (largo 3 m). In ordine le facciate sono rivolte approssimativamente a sud-est, sud-ovest e nord-ovest. Sviluppata su quattro elevazioni, la costruzione ha un'area di sedime di 157 m², un volume di 2.740 m³ e una percentuale di perimetro libero pari al 70%. Mentre i locali terranei sono adibiti ad attività commerciali, ciascuno dei piani superiori costituisce un'unità abitativa. Rispetto agli altri due edifici esaminati, pressoché privi di elementi decorativi sulle facciate esterne, le fronti del "palazzetto" prospicienti le vie Bara e Maqueda presentano intonaci bugnati e listati, mensole e cornici modanate; gli elaborati consultati attestano anche la presenza di controsoffitti voltati nell'ultima elevazione, mentre non si hanno informazioni sulla presenza di decorazioni interne.



Figure 7.2, 7.3, 7.4. Rilievi delle fronti dei tre edifici esaminati per i gruppi 1.I (a sinistra, da Giuffr  e Carocci, 1999), 1.II (al centro, da Di Benedetto, 2000), 2.II (a destra, da Di Benedetto, 2000).



Figure 7.5, 7.6, 7.7. Edificio in vicolo della Madonna (a sinistra). Edificio su via Argenteria (al centro e a destra).



Figure 7.8, 7.9, 7.10. Edificio in via Bara all'Olivella.

7.2 Modellazione degli edifici analizzati

Il programma WUFI Plus è uno strumento per la simulazione termica e igrometrica di un edificio in regime dinamico e si basa sul modello di calcolo sviluppato da Künzle (1994) per il passaggio di calore e vapore acqueo attraverso i componenti edilizi opachi. Per determinare le prestazioni complessive della costruzione, influenzate dal comportamento termico e igrometrico del suo involucro, gli elementi tecnici sono combinati tra loro in un modello più ampio, in cui l'edificio è diviso in una o più zone termiche² delimitate dagli elementi costruttivi stessi (Holm et al., 2003). Sulla base di condizioni climatiche esterne note, la temperatura e l'umidità relativa all'interno di ciascuna zona discendono dagli scambi termici e igrometrici che si verificano attraverso i componenti e sono simulate in modo iterativo mediante un bilancio che interessa l'intero edificio (Antretter, Radon, e Pazold, 2013; Pazold, Antretter, e Hermes, 2014). Poiché calcola sia le condizioni di ogni componente edilizio sia i parametri ambientali degli spazi interni, il programma consente di valutare le condizioni di benessere e il fabbisogno energetico.

Per lo studio qui esposto si è adoperata la versione di prova WUFI[®]Plus TEST V.3.0.0.31, attraverso la quale è possibile tener conto anche della ventilazione naturale. Anziché definire a priori il ricambio d'aria, il programma può infatti adoperare un modello di calcolo (*air flow model*) che, in base alla direzione e alla velocità del vento e alle conseguenti differenze di pressione, determina gli scambi d'aria che avvengono fra le zone termiche, e fra queste e l'esterno, attraverso le aperture, le connessioni e i componenti edilizi permeabili (Pazold et al., 2014; Antretter et al., 2015).

I componenti edilizi sono rappresentati da superfici piane, alle quali si associano una stratigrafia e quindi uno spessore: per ogni zona è però possibile indicare i valori effettivi della superficie utile e dei volumi lordo e netto. Nella schematizzazione dei tre edifici esaminati, i muri perimetrali sono rappresentati in corrispondenza dei paramenti esterni, le pareti interne alla mezzera, i solai e le coperture all'estradosso, i controsoffitti in corrispondenza dell'intradosso. Inoltre si è semplificata la distribuzione interna degli spazi rispetto a quella riportata nei rilievi consultati (figg. 7.12, 7.14, 7.15, 7.17, 7.18).

Ogni costruzione è stata suddivisa in zone termiche, che individuano le varie elevazioni e il vano scala (figg. 7.13, 7.16, 7.19). Per il "catoio" di vicolo della Madonna (1.I) ogni livello corrisponde a una zona termica. Anche gli spazi chiusi dai controsoffitti, per via del considerevole spessore, sono stati modellati come zone a se stanti.

Per l'edificio di via Argenteria (1.II), invece, ogni elevazione è suddivisa in due zone termiche, quella prospiciente la strada e quella su via dei Frangiai, per poter evidenziare l'influenza dell'esposizione e degli edifici circostanti sugli interventi ipotizzati. Poiché ogni unità abitativa è articolata su due livelli, collegati da una scala interna aperta sugli ambienti inferiori, a questi sono stati aggregati, nelle zone termiche, gli spazi di disimpegno del livello soprastante. Anche in questo caso, una delle zone termiche descrive il consistente spazio (alto mediamente 60 cm) compreso fra il controsoffitto del secondo piano e il solaio del terzo.

Infine, anche per il “palazzetto” di via Bara all’Olivella (2.II) ogni elevazione è suddivisa in due zone termiche, l’una affacciata sulla piazza e l’altra sul vicolo retrostante. Una zona autonoma è adoperata per descrivere lo spazio sotto tetto, che i controsoffitti separano dal quarto livello dell’edificio. Inoltre, gli elaborati grafici consultati evidenziano che l’unità abitativa del secondo piano ingloba tutta la corrispondente elevazione dell’edificio limitrofo, ma nel modello questa parte, seppur estesa, è stata tralasciata. Questa scelta scosta i risultati delle simulazioni dalle prestazioni effettive della fabbrica, ma è in linea con le indicazioni del P.P.E. del Centro storico, che prescrive per gli interventi, siano essi di manutenzione, ristrutturazione o restauro, un carattere omogeneo rispetto all’unità edilizia³.

Nel modello di ciascun edificio sono stati inseriti degli elementi rappresentativi dei volumi delle costruzioni circostanti, il cui ombreggiamento ha effetti significativi sull’energia solare assorbita e, dunque, sul benessere termico invernale ed estivo (fig. 7.11).

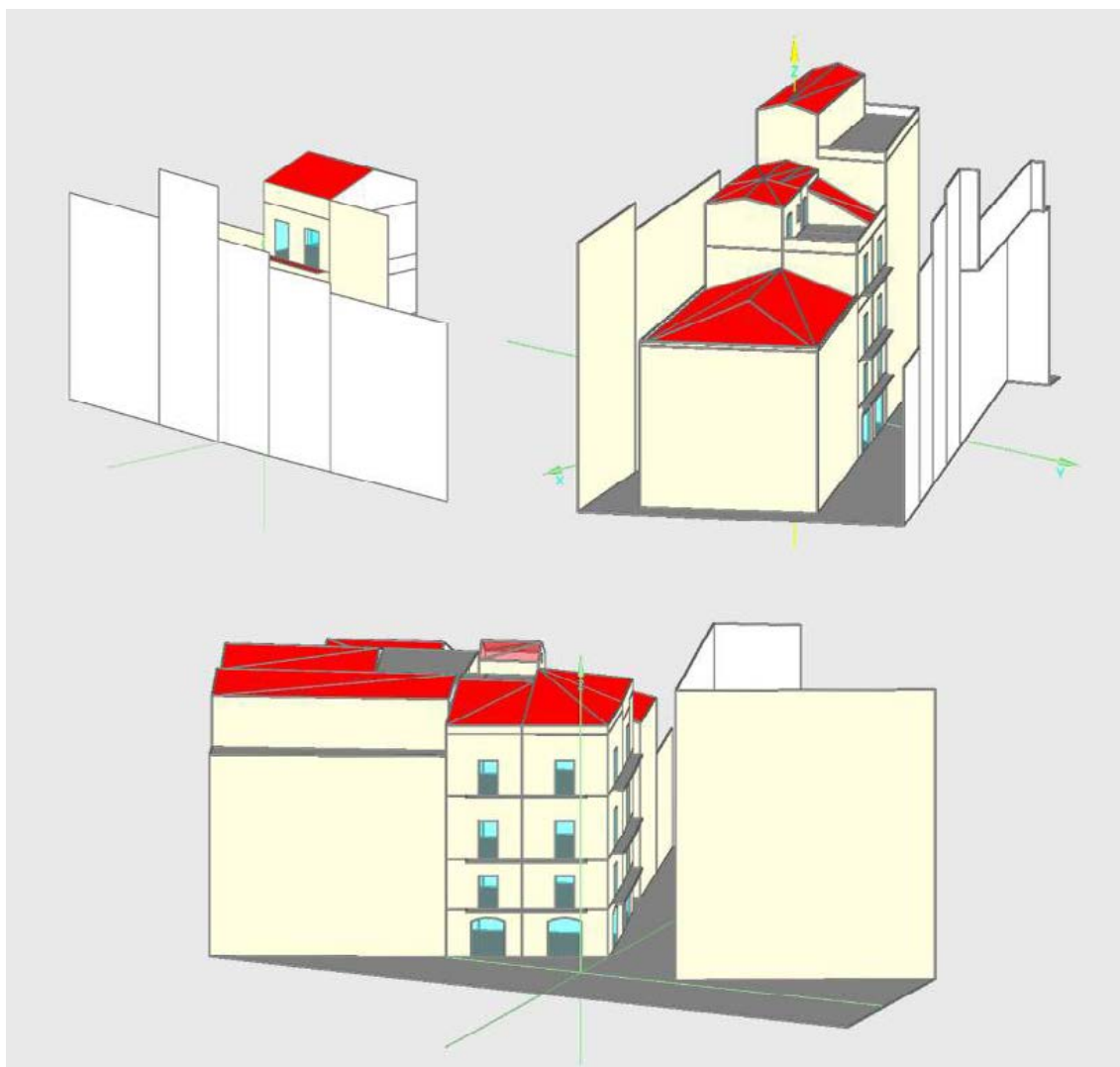


Figura 7.11. Modelli in *WUFI Plus* dei tre edifici analizzati e delle costruzioni circostanti.

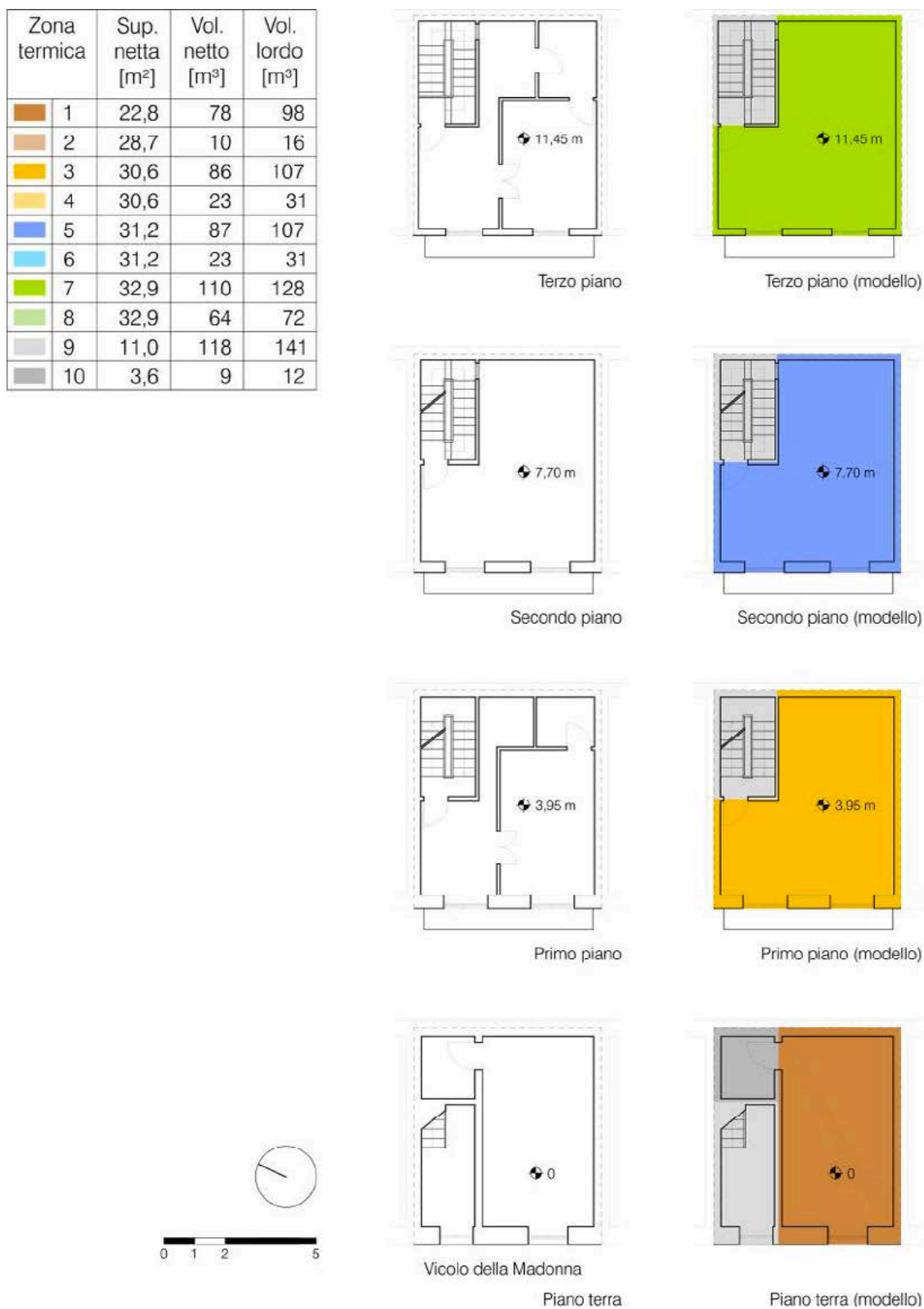


Figura 7.12. A sinistra: piante del "catoio" di vicolo della Madonna, rielaborate dal rilievo riportato in Giuffrè e Carocci (1999). A destra: piante semplificate adoperate nella modellazione dell'edificio mediante *WUFI Plus*.

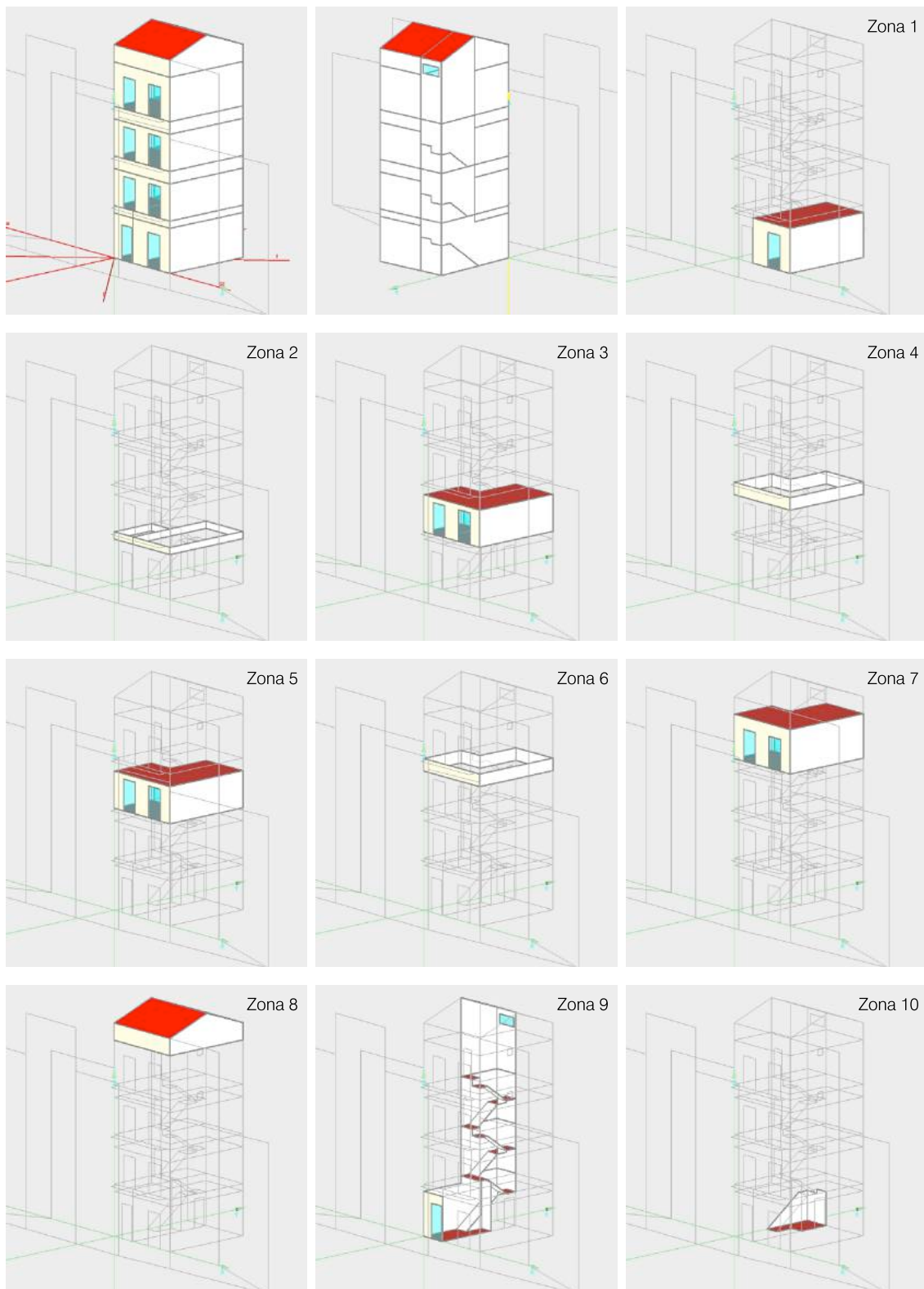


Figura 7.13. Modellazione del "catoio" di vicolo della Madonna in WUFI Plus e articolazione in zone termiche.

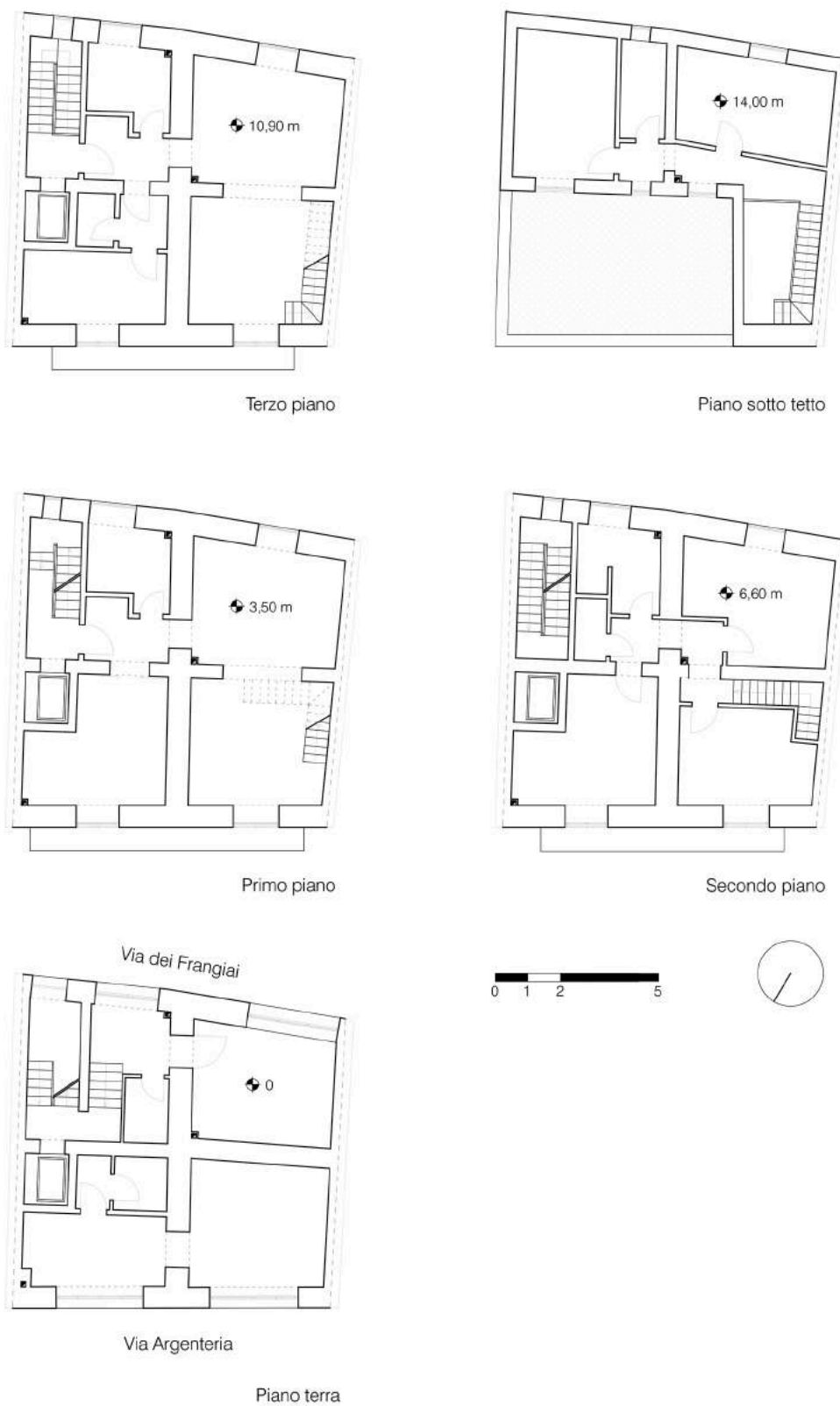


Figura 7.14. Piantes del "catoio" di via Argenteria, rielaborate dai disegni di progetto riportati in Di Benedetto (2000).



Figura 7.15. Piante semplificate adoperate nella modellazione mediante *WUFI Plus* del "catoio" di via Argenteria.

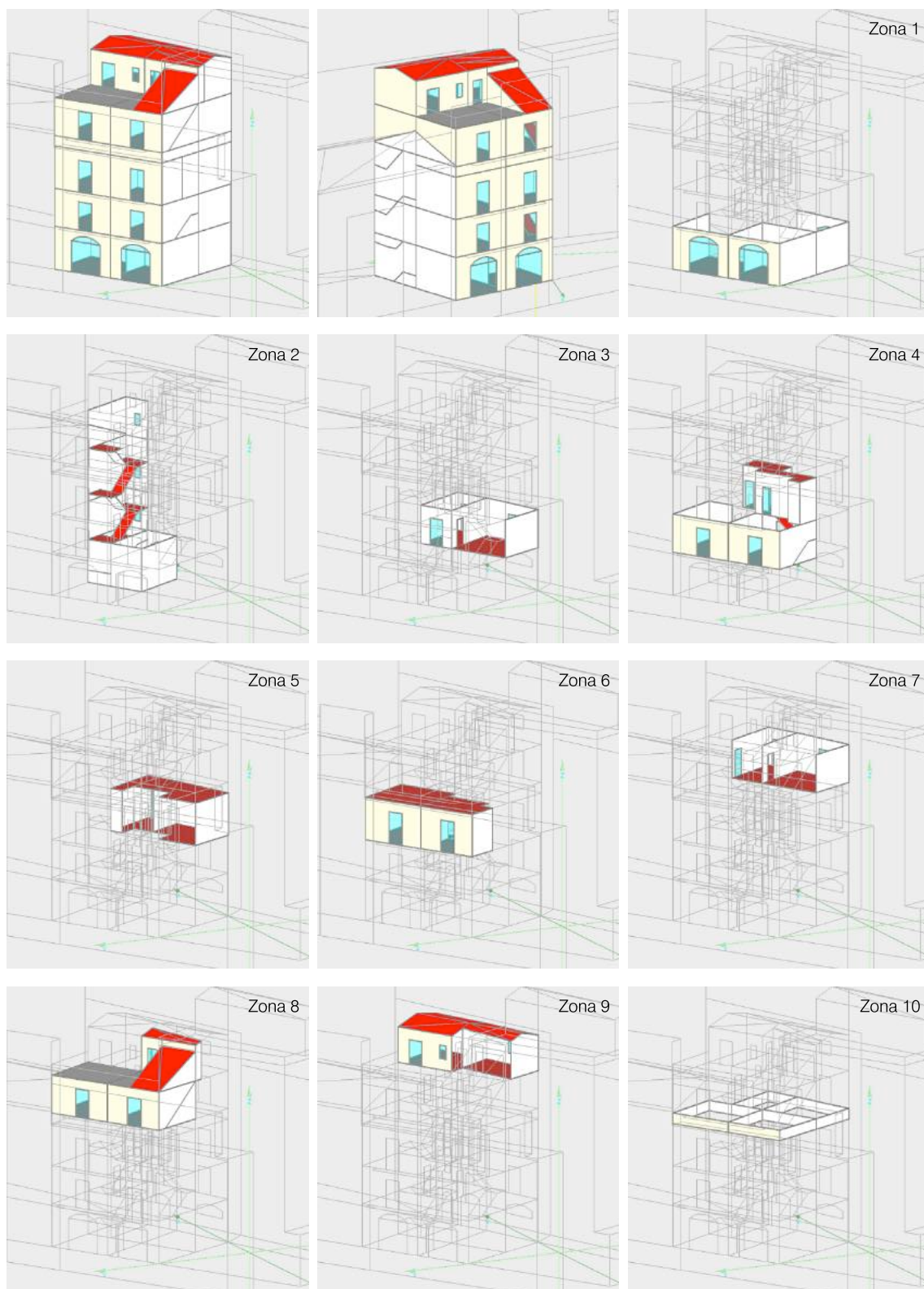


Figura 7.16. Modellazione del “catoio” di via Argenteria in WUFI Plus e articolazione in zone termiche.

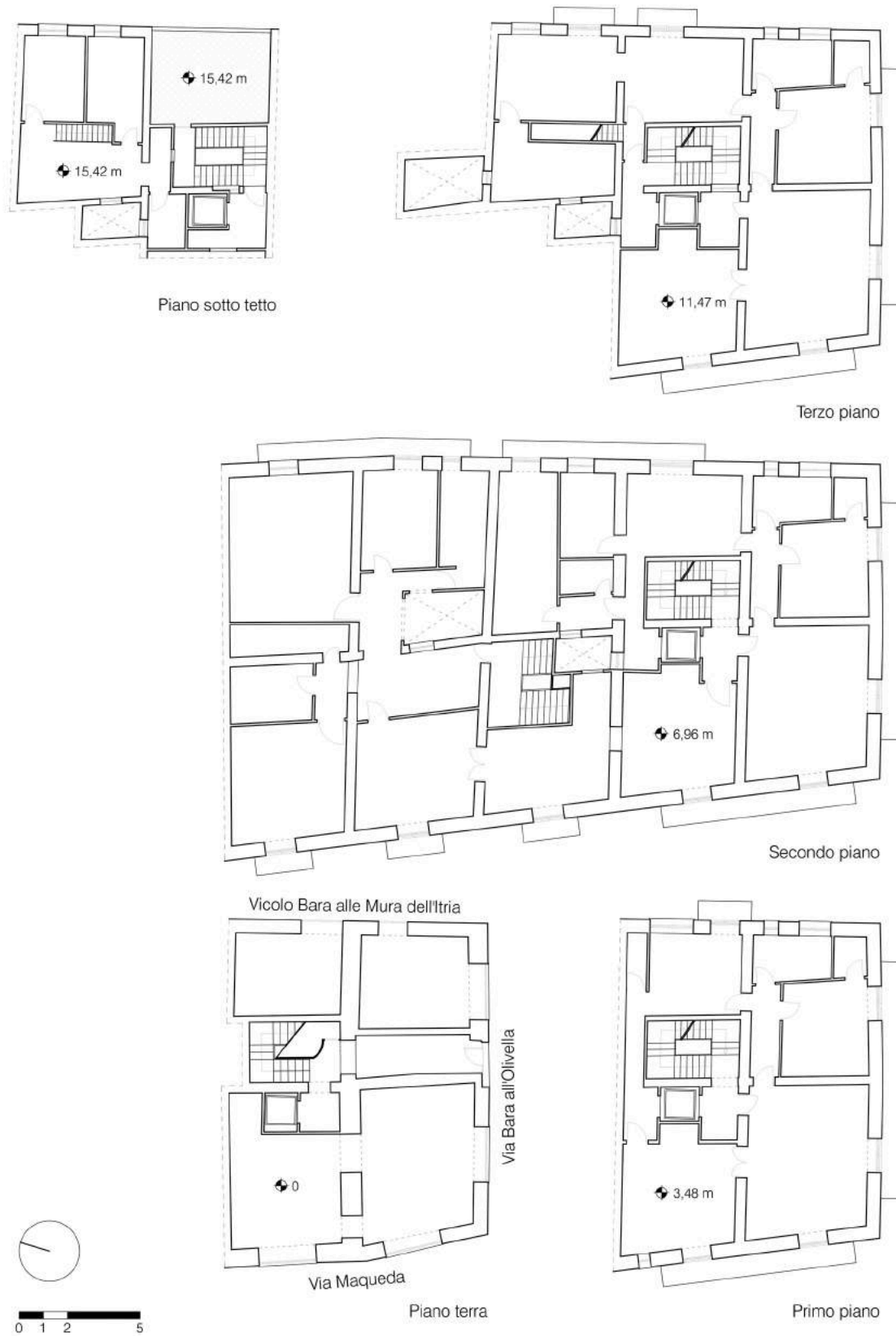


Figura 7.17. Piante rielaborate dal progetto del "palazzetto" di via Bara all'Olivella citato in Di Benedetto (2000).



Figura 7.18. Piante semplificate adoperate nella modellazione mediante *WUFI Plus* del "palazzetto" di via Bara.

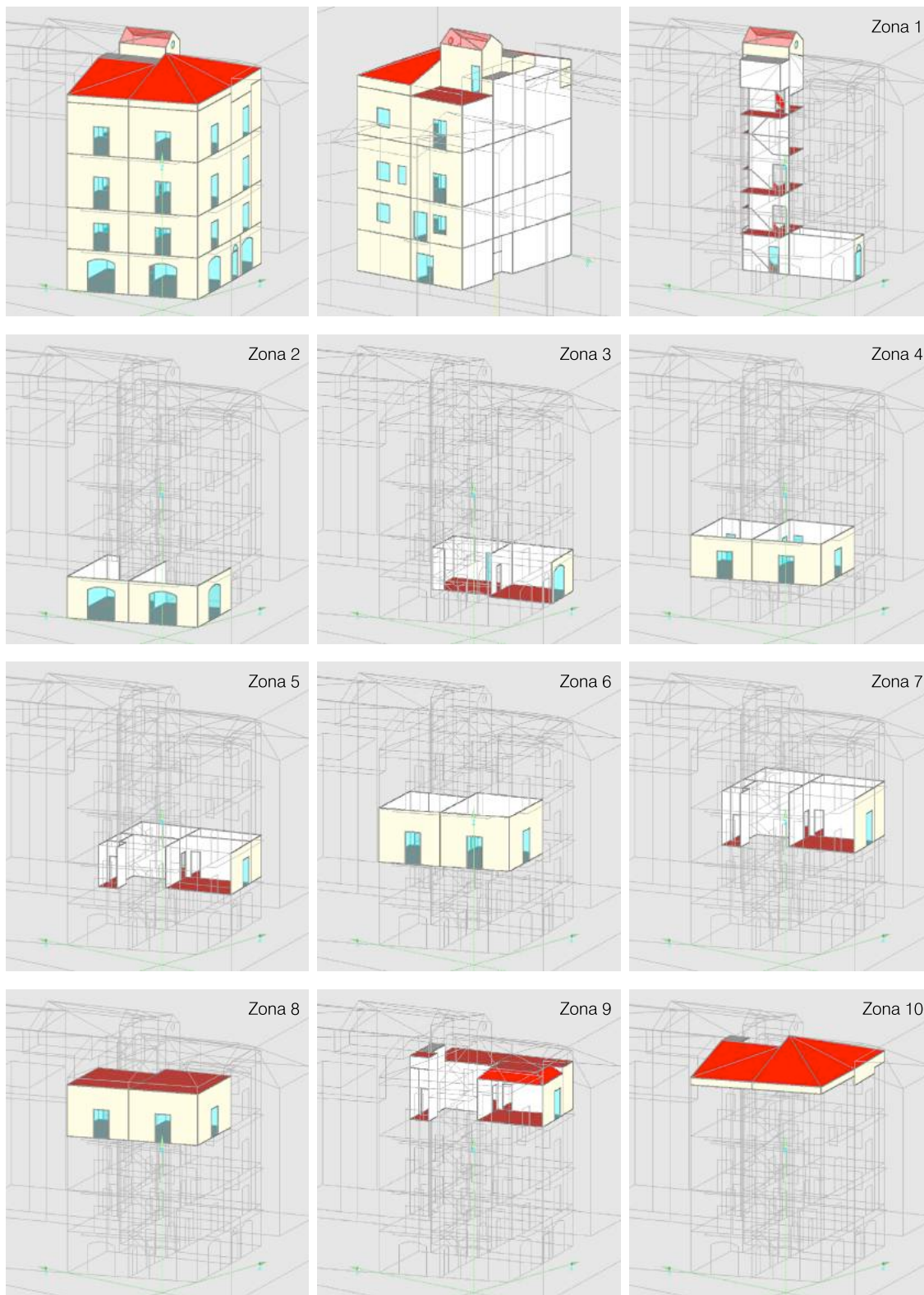


Figura 7.19. Modellazione del “palazzetto” di via Bara all’Olivella in WUFI Plus e articolazione in zone termiche.

7.3 Dati e ipotesi per le simulazioni

Le simulazioni, condotte con passo orario, coprono l'anno solare 2014 e includono un periodo preliminare della durata di trenta giorni (*initialization period*). Per consentire l'analisi di molteplici configurazioni con un'accuratezza elevata (*high calculation accuracy*), è stato necessario adoperare la modalità di calcolo "termica" (*calculation mode: thermal*), che diversamente da quella "igrotermica" (*calculation mode: hygrothermal*) considera gli scambi di calore ma non il trasporto di umidità all'interno dei componenti edilizi. Dunque le simulazioni svolte non sono significative dal punto di vista igrometrico, tuttavia consentono di valutare la risposta dell'edificio in termini di temperatura interna (dell'aria e operativa) e di dedurre il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.

7.3.1 Dati climatici

I dati meteorologici adoperati sono quelli orari misurati dalla stazione dell'Osservatorio Astronomico di Palermo "G. S. Vaiana"⁴ al Palazzo Reale, che riporta i valori minimi e massimi per la temperatura, l'umidità e la pressione dell'aria, la direzione del vento e i valori medio e massimo della sua velocità, l'irraggiamento medio e l'altezza delle precipitazioni. La radiazione solare diffusa è stata stimata a partire da quella globale, adoperando il modello di Perez⁵. Non si dispone di dati sulla controradiazione atmosferica, ovvero sulla radiazione in onde lunghe emessa dal cielo (cioè dall'atmosfera e dalle nuvole), che il programma richiede in quanto condiziona gli scambi termici dei componenti edilizi con l'esterno in modo non trascurabile, specialmente per gli elementi orizzontali e inclinati quali le coperture. Per stimarne tali effetti e dunque l'incidenza sulle prestazioni energetiche degli edifici, si è adoperato il metodo semplificato del programma WUFI Plus, che fornisce dei valori approssimati, sulla base di un fattore di nuvolosità. Attraverso i dati riportati dall'Ispra, per Palermo si è stimato un valore di 3/8, ovvero 0,375⁶.

Nel 2014 la temperatura media dell'aria in città è risultata di 19,0 °C, con un minimo giornaliero di 5,9 °C e un massimo di 34,9 °C. L'umidità relativa ha oscillato invece fra il 16% e il 98%, con una media del 63,6%. La somma delle precipitazioni verificatesi durante l'anno è pari a 807,4 mm di acqua. Per il vento, orientato prevalentemente a sud-ovest, si è registrata una velocità media di 2,59 m·s⁻¹, con un massimo di 15,9 m·s⁻¹. Quanto all'irraggiamento, infine, il valore orario massimo su base giornaliera ha oscillato fra 129 W·m⁻² il primo febbraio⁷ e 988 W·m⁻² il 5 maggio⁸. La media giornaliera è invece compresa fra 50 W·m⁻² il 31 dicembre⁹ (21 W·m⁻² se calcolata sulle ventiquattro ore anziché solo su quelle di irraggiamento) e 564 W·m⁻² il 29 maggio (sulle ventiquattro ore la media massima, 344 W·m⁻², è quella del 21 giugno).

Per la temperatura del terreno si è assunto un andamento sinusoidale (con periodo annuale) intorno alla temperatura media dell'aria durante l'anno. Per quest'ultima si è adoperato il valore 19,1 °C, media aritmetica dei valori medi mensili che la stazione meteorologica dell'Osservatorio fornisce per gli anni 1999-2008, 2013 e 2014. Per la curva si

è assunta un'ampiezza di 5°C, con valore massimo alla metà di agosto. Infine, per l'umidità relativa del terreno si è ipotizzato un valore costante del 98%.

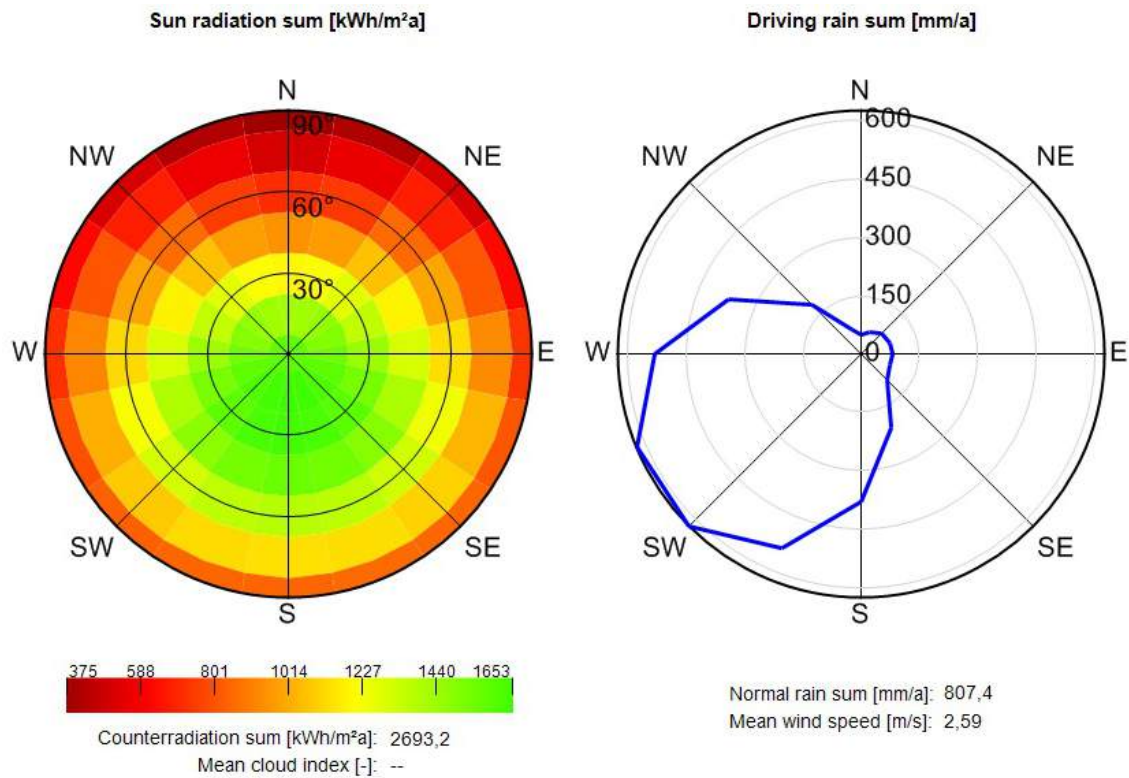


Fig. 7.20. Analisi climatica condotta dal programma WUFI Plus in base ai dati utilizzati nelle simulazioni svolte.

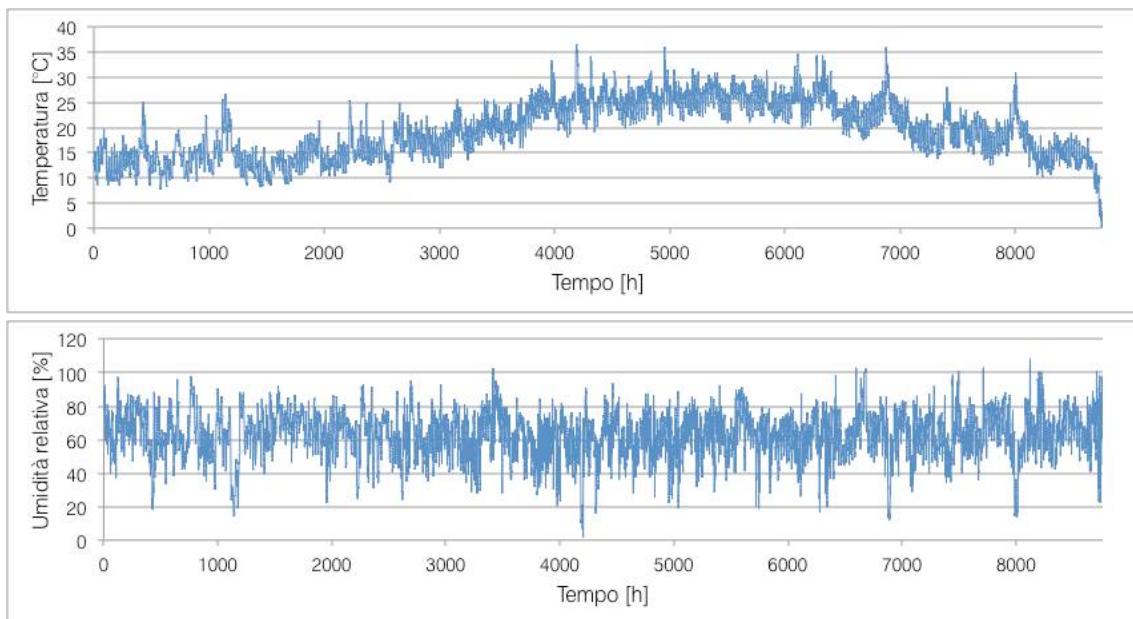


Figure 7.21, 7.22. Andamento della temperatura (a sinistra) e dell'umidità relativa (a destra) nel corso del periodo oggetto di simulazione (01/01/2014-01/01/2015).

7.3.2 Materiali e stratigrafie per i componenti opachi

Per gli elementi tecnici dei tre edifici esaminati, come anticipato, si sono ipotizzate soluzioni ricorrenti nella tradizione costruttiva palermitana (Giovanetti, 1997). I dati minimi che il programma richiede per l'esecuzione dei calcoli sono la massa volumica (ρ), la porosità, la conducibilità termica a secco (λ), la capacità termica (c_p) e il coefficiente di diffusione del vapore acqueo (μ). Queste caratteristiche sono state scelte in base ai dati riportati nelle norme tecniche (UNI 10351:2015, UNI EN ISO 10456:2008, UNI EN 1745:2012, UNI EN ISO 10077-1:2007), alla raccolta di dati contenuta in WUFI Plus, alla letteratura scientifica e a schede di prodotto.

Le murature sono state rappresentate per mezzo di tre strati, due per i rivestimenti a intonaco e uno per la parte strutturale, schematizzata come costituita da soli blocchi di calcarenite. A questi ultimi si sono attribuite, seguendo la UNI 10351, una massa volumica di $1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e una conducibilità termica di $0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Infatti le misure sperimentali condotte (cfr. parr. 4.3 e 4.4) mostrano, per le rocce e le murature indagate, un maggior accordo con questi valori che con quelli riportati dalla UNI EN 1745:2012. La differenza fra i valori di conducibilità termica che le norme attribuiscono alla calcarenite e alle malte da muratura¹⁰ è abbastanza contenuta, quindi la rappresentazione molto schematica adoperata nelle simulazioni introduce un errore meno rilevante rispetto a murature formate da altri materiali lapidei. Per evidenziare gli scostamenti dovuti alla mancata schematizzazione dei cementi di malta, le simulazioni più rilevanti sono state ripetute anche con la conducibilità di $0,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ riportata nella UNI EN ISO 10456:2008. Da questa norma, inoltre, si sono tratti il coefficiente di diffusione del vapore acqueo del materiale asciutto, pari a 30, e la capacità termica, $1.000 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, parametri che la UNI 10351 non riporta per i materiali lapidei naturali. La porosità, 0,39, è stata scelta in base ai risultati di laboratorio riportati da Alaimo, Giarrusso e Montana (2008) per vari campioni di calcarenite.

Per gli intonaci si sono adoperati i parametri riportati dalla raccolta del programma WUFI Plus. Al rivestimento esterno si è attribuito uno spessore di 3 cm realizzato con "Lime Mortar, fine", al quale sono associati una massa volumica di $1.785 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, una capacità termica di $850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e una conducibilità di $0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Per il rivestimento interno, invece, si è ipotizzato uno strato di 2 cm di "Lime Plaster (stucco, A-value: 3.0 kg/m²h0.5)", le cui caratteristiche termiche sono $\rho=1.600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Si è fatto riferimento a questo materiale per entrambi i paramenti nel caso di muri interni o di confine con unità edilizie limitrofe.

In merito alle caratteristiche superficiali delle murature, in particolare l'assorbimento e l'emissione di radiazione solare del paramento esterno, si sono assunti un coefficiente di assorbimento delle radiazioni a onde corte di 0,4 e un'emissività nell'infrarosso di 0,9¹¹.

Per le chiusure e le partizioni orizzontali si è fatto riferimento alla raccolta di materiali del programma WUFI Plus. Le chiusure contro terra sono state schematizzate con uno strato inferiore di sabbia (10 cm di spessore, "sand", $\rho=1.579 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,

$\lambda=0,505 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$), sul quale la pavimentazione ceramica (2 cm, per la quale si è fatto riferimento al “brick (old)”, $\rho=1.670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) è posata su uno strato di malta di allettamento (2 cm, “bonding mortar”, $\rho=1.350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

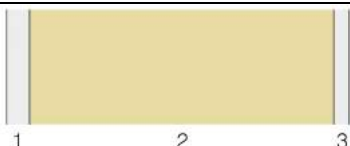

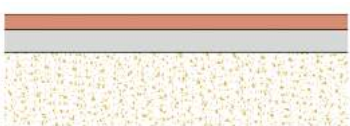
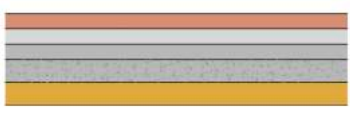


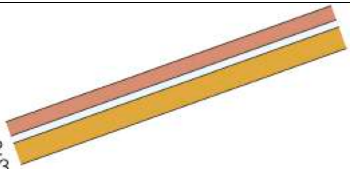
Per i solai di piano si è ipotizzato che i campi fra le travi siano chiusi con il sistema tradizionale dei travicelli rustici in legno di castagno (3 cm di spessore). Si sono considerate una massa volumica di $580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, una capacità termica di $1.600 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ e una conducibilità termica di $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (cfr. par.3.3). Il massetto a granulometria variabile è rappresentato con uno strato inferiore di “sabbia” (3 cm) e uno superiore di malta (“bonding mortar”, 2 cm). Su questo la pavimentazione ceramica (2 cm) è posta mediante una malta di allettamento (nuovamente “bonding mortar”, 2 cm).

I controsoffitti sono rappresentati con due strati, uno superiore di legno tenero a simulare le stuoie di canne (1 cm, “softwood”, $\rho=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=1.500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) e uno inferiore d’intonaco (2 cm). Qualora l’intercapedine delimitata dal controsoffitto e dal solaio sia mediamente inferiore a 20 cm, l’orizzontamento è stato schematizzato con un unico componente, nel quale l’intercapedine è simulata con uno strato d’aria; in caso contrario, si sono definiti due componenti distinti e lo spazio che essi delimitano costituisce una zona termica a se stante (cfr. par. 7.2).

Anche per le coperture inclinate si è supposto che i campi fra le travi siano chiusi con travicelli rustici (“mezzi ginelli”) di castagno, rappresentati in modo analogo ai solai di piano. Su di essi è disposto il manto di copertura in coppi, rappresentato con uno strato di laterizi (2 cm, “brick (old)”). Al di sotto di questo, un’intercapedine d’aria con ricambio di 1 h^{-1} simula la ventilazione che si verifica sotto il manto. L’assorbimento e l’emissione di radiazione solare attraverso il tegumento sono regolati da un coefficiente di assorbimento pari a 0,67 e da un’emissività di 0,9.

Infine, nel caso delle coperture a terrazza si è supposto che i “mezzi ginelli” di castagno siano sovrastati, per garantire la tenuta all’acqua (Giovanetti, 1997) da uno strato di “pianelle” di cotto (“brick (old)”, 2 cm) e da un massetto legato dello spessore di 6 cm (al quale, per assenza di dati più appropriati, si sono attribuiti quelli di una malta di rinzafo a base di calce e cemento, “lime cement mortar, coarse”, con $\rho=1.910 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Supponendo una pavimentazione in mattoni smaltati, si sono considerati un coefficiente di assorbimento di 0,36 e un’emissività di 0,9, come indicati dalla raccolta di dati del programma.

Gli interventi di miglioramento (cfr. par. 7.4) delle murature consistono nell’applicazione di un rivestimento isolante interno o esterno. Nelle simulazioni si è supposta in prima istanza la sostituzione dell’intonaco esistente con un termoisolante dello spessore di 3 cm. Per l’applicazione interna, dunque, la sezione della parete aumenta di un centimetro rispetto alla dimensione originaria. Le caratteristiche termofisiche del materiale sono quelle che la norma UNI EN 1745:2012 riporta per malte da intonaci con massa volumica a secco di $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ovvero una conducibilità termica¹² di $0,086 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, un coefficiente di diffusione del vapore

MURATURA ESTERNA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Intonaco esterno	1.785	850	0,7	0,03
	2	Muratura in calcarenite (UNI 10351) oppure (UNI EN 1745)	1.500 1.500	1.000 1.000	0,63 0,85	vario vario
	3	Intonaco interno	1.600	850	0,7	0,02
MURATURA INTERNA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Intonaco interno	1.600	850	0,7	0,02
	2	Muratura in calcarenite (UNI 10351) oppure (UNI EN 1745)	1.500 1.500	1.000 1.000	0,63 0,85	vario vario
	3	Intonaco interno	1.600	850	0,7	0,02
CHIUSURA CONTRO TERRA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Sottofondo in sabbia	1.579	850	0,505	0,1
	2	Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,03
	3	"Pianelle" in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
		$U=2,2$ $W·m^{-2}K^{-1}$				
SOLAIO DI PIANO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	"Pianelle" in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
	2	Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,02
	3	Massetto a granulometria variabile	1.350	850	0,8	0,02
	4		1.579	850	0,505	0,03
	5	Travicelli in castagno	580	1.600	0,16	0,03
		$U=1,5$ $W·m^{-2}K^{-1}$				
CONTROSOFFITTO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Stuoie di canne	400	1.500	0,09	0,01
	2	Intonaco interno	1.785	850	0,7	0,02
		$U=2,9$ $W·m^{-2}K^{-1}$				
COPERTURA PIANA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Mattoni maiolicati	1.670	840	0,4	0,02
	2	Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,02
	3	Massetto	1.910	850	0,8	0,06
	4	"Pianelle" in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
	5	Travicelli in castagno	580	1.600	0,16	0,03
		$U=1,9$ $W·m^{-2}K^{-1}$				
COPERTURA INCLINATA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Coppi in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
	2	Intercapedine sotto i coppi	1,3	1.000	0,071	0,01
	3	Travicelli in castagno	580	1.600	0,16	0,03
		$U=1,9$ $W·m^{-2}K^{-1}$				

acqueo pari a 20, una capacità termica specifica di $1.000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. La letteratura scientifica, infatti, considera ad alte prestazioni gli intonaci termoisolanti con massa volumica inferiore a $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Barbero, Dutto, Ferrua, e Pereno, 2014).




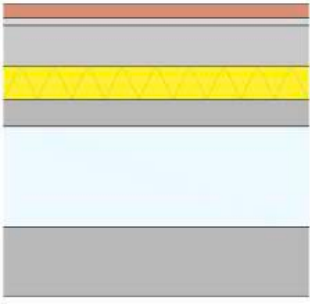
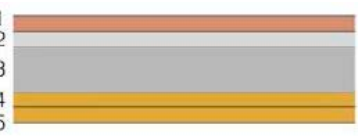
Per i rivestimenti a pannelli interni si è assunta l'applicazione di un materiale isolante naturale e permeabile al vapore. A titolo esemplificativo nelle simulazioni svolte si fa riferimento a pannelli semirigidi in sughero espanso con $\rho=130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $\lambda=0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (UNI 10351:2015). In base alle schede di prodotto disponibili in commercio si sono assunti una capacità termica specifica di $1.900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ e un coefficiente di diffusione del vapore acqueo pari a 20. Lo spessore dei pannelli, in numero intero di centimetri, è il minimo necessario per rispettare il limite di trasmittanza termica di $0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ fissato dal D.P.R. 59 del 2009 per i componenti verticali dell'involucro opaco in zona climatica B¹³. Per la finitura del paramento interno è prevista l'applicazione di uno strato dello spessore di 1 cm, mantenendo le stesse caratteristiche considerate per l'intonaco.

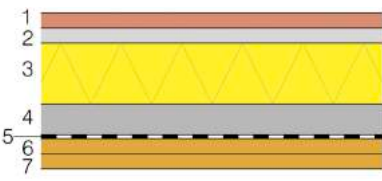
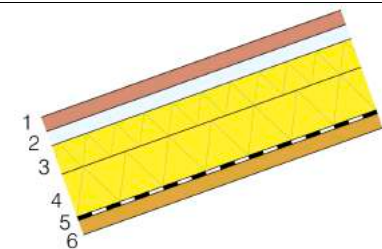

Per la chiusura contro terra si prevedono la realizzazione di un'intercapedine ventilata con casseri a perdere in plastica riciclata (*igloo*) dell'altezza di 15 cm e l'applicazione di uno strato isolante rigido per rispettare il limite di trasmittanza termica (prima 0,49 e ora $0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$) che la normativa prevede in zona B per le chiusure orizzontali "di pavimento" verso l'esterno. Nelle simulazioni, l'intercapedine è schematizzata come uno strato d'aria di 150 mm ventilato (con uno scambio d'aria con l'esterno costante e pari a $0,5 \text{ h}^{-1}$) su un sottofondo di 10 cm in calcestruzzo (C12/15); sulla soletta armata (C35/45) sono disposti un pannello di 5 cm di polistirene espanso ad alta densità e un massetto in argilla espansa dello spessore di 6 cm; a quest'ultimo il pavimento in mattoni di laterizio è legato per mezzo di una malta di allettamento. Le caratteristiche termiche dei materiali sono desunte dalla raccolta del programma, a meno di quelli relativi al massetto alleggerito con argilla espansa, per il quale si sono impiegate schede di prodotto disponibili in commercio.

Per gli interventi sulle strutture di copertura è prevista la ventilazione sotto il manto, simulata con un'intercapedine d'aria di 20 mm (con ricambio d'aria di 2 h^{-1}). L'isolamento è ottenuto con pannelli di fibra di legno ("Wood-Fibre Insulation Board" da WUFI Plus, $\rho=155 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=2.000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$), il cui spessore, 10 cm, consente di raggiungere una trasmittanza termica di $0,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, inferiore al limite normativo di $0,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ¹⁴ per le coperture in zona climatica B. Poiché si ipotizza che l'intervento si accompagni a un consolidamento della copertura, i travicelli rustici sono sostituiti con un tavolato in legno d'abete (2 cm). Nelle simulazioni che esaminano l'applicazione al manto di copertura di una pittura riflettente (cfr. par. 7.4), il coefficiente di assorbimento è ridotto a 0,30 (Marsili et al., 2014; Pisello e Cotana, 2014). Per le coperture piane, insieme alla realizzazione di un doppio tavolato incrociato si è prevista l'applicazione di un isolamento in polistirene espanso ad alta densità dello spessore di 8 cm.

In alcune simulazioni relative agli edifici in cui il sottotetto è chiuso inferiormente da un controsoffitto (cfr. par. 7.4), l'isolamento è applicato a quest'ultimo. Nuovamente si è

scelto un isolante naturale, ovvero un feltro in lana di pecora, dello spessore di 10 cm, le cui caratteristiche sono desunte da schede di prodotto ($\rho=50,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p=1.987 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda=0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$); per la sua elevata traspirabilità, non si è prevista l'applicazione di una barriera al vapore come suggerito da diverse schede tecniche e dalla letteratura. Anche in questo caso sono previsti il consolidamento della copertura e la ventilazione sotto coppo¹⁵.

MURATURA ISOLATA CON INTONACO ESTERNO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Intonaco termoisolante	300	1000	0,086	0,03
	2	Murature in calcarenite (UNI 10351) oppure (UNI EN 1745)	1.500 1.500	1.000 1.000	0,63 0,85	vario vario
	3	Intonaco interno	1600	850	0,7	0,02
MURATURA ISOLATA CON INTONACO INTERNO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Intonaco esterno	1.785	850	0,7	0,03
	2	Murature in calcarenite (UNI 10351) oppure (UNI EN 1745)	1.500 1.500	1.000 1.000	0,63 0,85	vario vario
	3	Intonaco termoisolante	300	1000	0,086	0,03
MURATURA ISOLATA CON PANNELLI INTERNI		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	Intonaco esterno	1.785	850	0,7	0,03
	2	Murature in calcarenite (UNI 10351) oppure (UNI EN 1745)	1.500 1.500	1.000 1.000	0,63 0,85	vario vario
	3	Pannello in sughero espanso	130	1.900	0,04	0,02 ÷ 0,07
	4	Finitura interna	1.600	850	0,7	0,01
CHIUSURA CONTRO TERRA ISOLATA E AREATA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	7	Conglom. di sottofondo	2.200	850	1,6	0,1
	6	Intercapedine d'aria	1,3	1.000	0,94	0,15
	5	Massetto armato soprastante i casseri a perdere	2.220	850	1,6	0,04
	4	EPS	30	1.500	0,04	0,05
	3	Mass. con argilla esp.	600	1.000	0,144	0,06
	2	Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,01
	1	"Pianelle" in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
U=0,47 W·m ⁻² ·K ⁻¹						
SOLAIO DI PIANO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	1	"Pianelle" in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
	2	Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,02
	3	Mass. con argilla esp.	600	1.000	0,144	0,06
	4	Tavolato in abete	400	1.500	0,09	0,02
	5	Tavolato in abete	400	1.500	0,09	0,02
U=0,81 W·m ⁻² ·K ⁻¹						

COPERTURA PIANA ISOLATA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	$U=0,38$ W·m ⁻² ·K ⁻¹	1 Mattoni maiolicati	1.670	840	0,4	0,02
		2 Malta di allettamento	1.350	850	0,8	0,02
		3 EPS	30	1.500	0,04	0,08
		4 Mass. con argilla esp.	600	1.000	0,144	0,04
		5 Memb. imp. (S _d =0,1m)	130	2.300	2,3	0,001
		6 Doppio tavolato in	400	1.500	0,09	0,02
		7 abete	400	1.500	0,09	0,02
COPERTURA INCLINATA ISOLATA		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	$U=0,34$ W·m ⁻² ·K ⁻¹	1 Coppi in laterizio	1.670	840	0,4	0,02
		2 Intercap. sotto i coppi	1,3	1.000	0,13	0,02
		3 Pannelli termoisolanti	155	2.000	0,042	0,04
		4 in fibra di legno	155	2.000	0,042	0,06
		5 Membrana impermeabile (S _d =0,1m)	130	2.300	2,3	0,001
		6 Tavolato in abete	400	1.500	0,09	0,02
CONTROSOFFITTO ISOLATO		Descrizione degli strati	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Spessore [m]
	$U=0,3$ W·m ⁻² ·K ⁻¹	1 Feltro in lana di pecora	50,5	1.987	0,034	0,1
		2 Stuoie di canne	400	1.500	0,09	0,01
		3 Intonaco interno	1.600	850	0,7	0,02

7.3.3 Infissi e dispositivi di ombreggiamento

I parametri che il programma richiede per simulare il comportamento degli infissi sono la trasmittanza termica complessiva del componente, la frazione trasparente della sua superficie, i fattori solari (SHGC) per la radiazione solare diretta e per quella diffusa, l'emissività nell'infrarosso. Partendo dai dati geometrici dei vani di apertura desunti dai rilievi degli edifici, le dimensioni degli elementi d'infisso sono state definite per analogia con i numerosi serramenti storici palermitani studiati da Culotta, La Franca e Scianna (1998). In particolare si è assunto che i montanti e i traversi dei telai abbiano uno spessore di 5 cm e una larghezza di 6,5 cm¹⁶; che le specchiature opache siano costituite da tavole spesse 2 cm; che i listelli fermavetro abbiano una larghezza di 2 cm e lo stesso spessore del telaio; che i vetri singoli siano spessi 4 mm. Sotto queste ipotesi, nelle porte-finestre la frazione trasparente dei serramenti è di poco inferiore alla metà della superficie del vano di apertura; il rapporto è debolmente maggiore per le finestre; per le porte esterne la porzione vetrata è nulla, a meno di quelle che danno accesso ai locali commerciali¹⁷.

Secondo la norma ISO 10077-1:2006, la trasmittanza termica di un telaio ligneo spesso 50 mm è appena superiore a 2 W·m⁻²·K⁻¹ se fatto di legno tenero ($\rho=500$ kg·m⁻³, $\lambda=0,13$ W·m⁻¹·K⁻¹) e leggermente inferiore a 2,4 W·m⁻²·K⁻¹ se di legno duro ($\rho=700$ kg·m⁻³, $\lambda=0,18$ W·m⁻¹·K⁻¹). Poiché essenze comuni negli infissi storici palermitani sono il castagno e soprattutto il pino (cfr. par. 3.3), si è assunta una trasmittanza intermedia di 2,2 W·m⁻²·K⁻¹.

Per le specchiature si adopera invece un valore di $3,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, avendo assunto una conducibilità di $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ¹⁸. Seguendo le indicazioni delle ISO 10077-1:2006 e dunque della UNI/TS 11300-1:2014, ai vetri si è attribuita una trasmittanza termica di $5,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$; essendo le lastre vetrate singole, conformemente alla stessa ISO 10077-1¹⁹ non si è tenuto conto di ponti termici lineari in corrispondenza della connessione con gli elementi del telaio ligneo. Il fattore solare, SHGC, è stato posto pari a 0,81 sia rispetto alla radiazione diretta sia rispetto a quella diffusa; l'emissività a 0,8.

Avendo supposto che gli edifici e i loro componenti abbiano uno stato di conservazione "normale", per gli infissi si propone un miglioramento prestazionale dal punto di vista della tenuta all'aria (cfr. par. 7.3.4) e della resistenza termica, nonostante questa scelta sia raramente preferita alla sostituzione con serramenti nuovi. Per conseguire il secondo obiettivo si riduce la trasmittanza termica delle lastre vetrate a $2,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. A tal fine si può pensare all'impiego di un doppio vetro delle dimensioni di 4-6-4 mm con riempimento della camera con gas Krypton, oppure ricorrere a sistemi, come quelli sotto vuoto, che conseguono le stesse prestazioni con uno spessore più contenuto. Avendo ipotizzato la sostituzione dei vetri singoli con quelli doppi, il fattore solare è stato ridotto da 0,81 a 0,70. Al contempo l'introduzione del doppio vetro non consente di tralasciare i ponti termici lineari in corrispondenza dei bordi delle lastre. A tal proposito, nel caso di telai lignei, la ISO 10077-1 indica un valore di trasmittanza termica lineare pari a $\psi_g=0,06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, che aumenta a $\psi_g=0,08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ qualora le lastre vetrate siano trattate con rivestimenti superficiali. Questo secondo valore è stato impiegato nelle simulazioni in cui si sono esaminati il contributo di vetri a basso fattore solare (SHGC=0,30) alla riduzione del surriscaldamento estivo e i loro effetti sul fabbisogno energetico invernale (cfr. par. 7.4). Nel calcolo della trasmittanza termica complessiva degli infissi si è prevista l'applicazione di un'unica lastra vetrata sulla quale applicare gli originari listelli, così da ridurre la lunghezza del ponte termico di bordo.

I tre edifici analizzati sono caratterizzati, infine, dalla presenza di persiane esterne, alle quali nelle simulazioni si è attribuito un fattore di ombreggiamento pari a 0,25; non si è invece assegnata all'infisso una resistenza termica aggiuntiva, ammessa dalla norma ISO 10077-1 in base al tipo di dispositivo di ombreggiamento. Il periodo d'impiego delle persiane, e le ore giornaliere di utilizzo, sono stati definiti in modo approssimato adoperando il diagramma solare per Palermo (latitudine $38^{\circ}07'$, longitudine $13^{\circ}22'$)²⁰ e tenendo conto dell'ombreggiamento degli edifici circostanti²¹.

7.3.4 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è simulata in WUFI Plus adoperando un modello empirico (*power law equation*) che lega la differenza di pressione fra i due ambienti al flusso d'aria dall'uno all'altro. Questa relazione, nella sua forma generale, è espressa, in termini di volume del flusso d'aria, come $Q=K\cdot\Delta P^n$, in cui Q è il volume del flusso in $\text{dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, K è il coefficiente di flusso in $\text{dm}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-n}$ e n, adimensionale, è l'esponente di flusso. I parametri K e n caratterizzano la tenuta all'aria dell'apertura (Orme e Leksmono, 2002).

In WUFI Plus l'equazione è espressa in termini di flusso di massa d'aria ed è normalizzata rispetto all'area dell'apertura, $\dot{m}' = 0,001 \cdot \rho \cdot A \cdot C_A \cdot \Delta P^n$, nella quale ρ è la densità dell'aria in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e C_A è il coefficiente di flusso, misurato in $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-n}$ proprio perché normalizzato rispetto all'area. Per tutte le zone esaminate, attraverso un processo iterativo, il programma verifica che sia rispettato il bilancio di massa $\sum_j \dot{m}'_{ij} = 0$.

Per ogni zona termica bisogna indicare i componenti opachi e trasparenti e le aperture "rilevanti per il flusso", attraverso i quali cioè si verifica lo scambio d'aria con l'esterno e con le altre zone. Nelle simulazioni svolte si sono considerati tali tutti gli infissi e le aperture interni ed esterni, per i quali si sono indicate le dimensioni della parte apribile, il coefficiente e l'esponente di flusso²². Per questi ultimi, non avendo reperito dati più specifici, si è attinto a quelli raccolti da Orme e Leksmono (2002) (cfr. par. 3.4), che per le finestre a battente, prive di guarnizioni di tenuta, riportano un valore mediano di $0,74 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$ (il coefficiente di flusso è riferito alla lunghezza dei giunti) con un esponente di flusso pari a 0,6. Nel caso delle porte, anch'esse a battente e senza guarnizioni, il coefficiente indicato è $1,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$ per quelle esterne e $1,3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$ per quelle interne; in entrambi i casi l'esponente di flusso è 0,6.

Le indagini diagnostiche rintracciate in letteratura (cfr. par. 3.4) evidenziano che la permeabilità all'aria è significativa anche in corrispondenza dei giunti tra infissi e pareti e

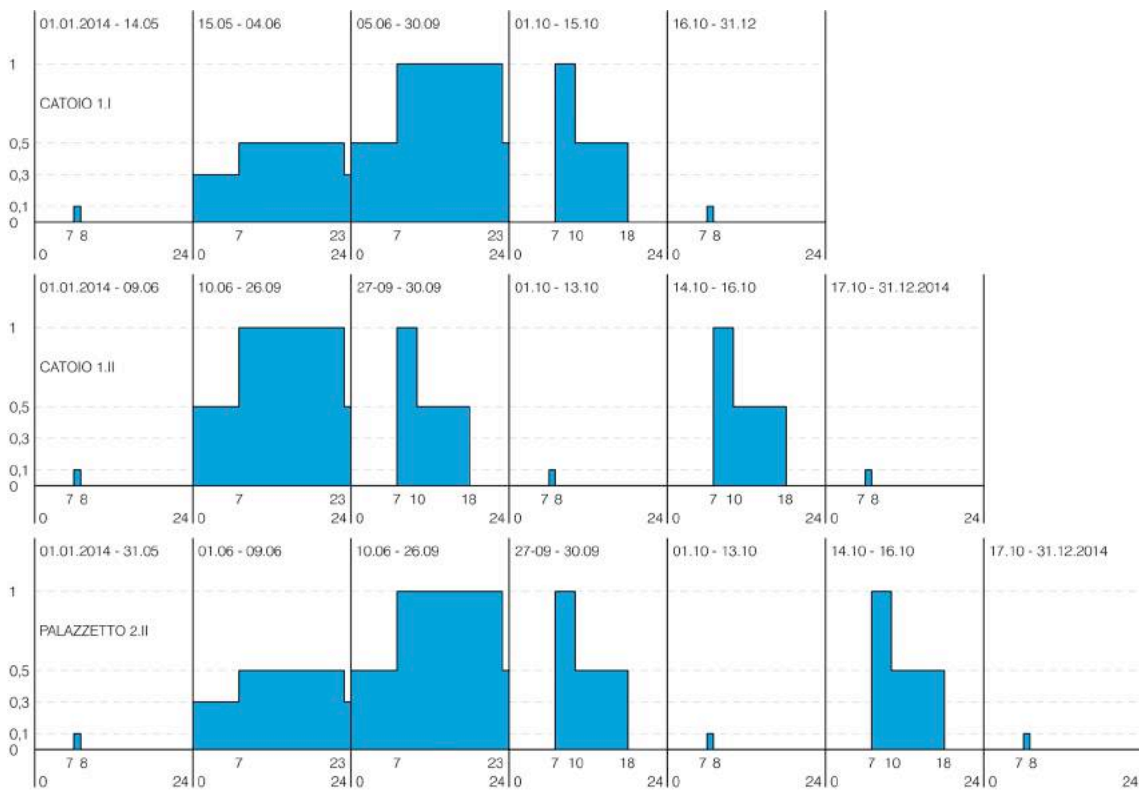


Figura 7.23. I diagrammi riportano, per i serramenti dei tre edifici, lo schema di apertura adoperato per determinare il contributo della ventilazione naturale. Per ciascun periodo si riportano le modalità giornaliere di utilizzo in termini di frazione di superficie (in ordinata) e ora (in ascissa) di apertura.

delle connessioni tra i componenti opachi. Sebbene dei valori siano riportati anche per essi in Orme e Leksmono (2002), tuttavia si è ritenuto opportuno tralasciarli per limitare l'influenza sui risultati da parte di parametri non confortati da indagini strumentali. L'unica eccezione è costituita dai solai e dai controsoffitti che delimitano le intercapedini di notevole spessore, le quali, per tale ragione, sono state trattate come zone termiche a se stanti (cfr. par. 7.2); il modello di calcolo del programma, infatti, richiede per ogni zona una fonte d'ingresso e una di uscita dell'aria e ciò ha reso necessario considerare tali elementi tecnici permeabili, sebbene con elevata ermeticità (a tale scopo si è impiegato un coefficiente di flusso di $0,001 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-n}$).

Questi parametri consentono di determinare gli scambi di aria e calore che si verificano per infiltrazione, mentre la ventilazione naturale è valutata in base alle modalità d'apertura degli infissi. A tal fine si è svolta una simulazione preliminare, fondata sull'ipotesi non realistica che gli infissi siano permanentemente chiusi, così da individuare in prima approssimazione il periodo di surriscaldamento, che per via della mancata apertura degli infissi si protrae per buona parte del mese di ottobre. Sulla base dei risultati di questa simulazione, in una seconda si è posto che gli infissi siano aperti nelle ore in cui la temperatura interna superi 25°C ²³ e i risultati così ottenuti sono stati impiegati per definire le modalità di utilizzo dei serramenti per la ventilazione naturale (vedi fig. 7.23). Per ciascun edificio, l'apertura degli infissi è stata mantenuta invariata per tutte le configurazioni analizzate in modo da limitare il numero delle variabili²⁴.

7.3.5 Modalità di occupazione degli edifici e utilizzo degli impianti

Nelle simulazioni svolte si è ipotizzato che ciascuna unità immobiliare sia abitata da una famiglia di quattro persone, distribuendo omogeneamente fra le zone termiche i carichi termici legati alla presenza di individui e apparecchiature. A tal fine si è fatto riferimento ai dati disponibili in WUFI Plus, che riportano il calore scambiato per convezione e per irraggiamento, la produzione di umidità e quella di anidride carbonica (tab. 7.1). Sempre attingendo alla stessa raccolta di valori, si è posto che nelle zone termiche rappresentative dei vani scala sia presente una persona nell'atto di camminare. Per i locali di piano terra, infine, si è assunta per ogni zona termica la presenza di due persone.

La versione del programma adoperata permette di considerare i consumi energetici connessi all'impiego di un impianto ideale di climatizzazione. Se ne stabiliscono la potenza (fissata per gli edifici analizzati a un valore di riferimento di 100 kW), la frazione di questa destinata a ciascuna zona termica, le modalità di funzionamento (cioè le ore del giorno e i periodi dell'anno in cui l'impianto è utilizzabile e la potenza alla quale può essere utilizzato). Il programma calcola l'energia necessaria perché l'impianto mantenga ai valori minimo e massimo di riferimento la temperatura interna, qualora questa scenda sotto il primo o superi il secondo per effetto delle condizioni climatiche esterne. Seguendo le indicazioni della norma UNI EN 15251:2008 (tabella A.2) in merito a edifici

residenziali, nelle simulazioni svolte si sono assunte una temperatura minima di 20°C, al di sotto della quale si attiva il riscaldamento, e una temperatura massima di 26°C, al di sopra della quale l'ambiente interno è raffrescato meccanicamente.

Ora	Calore		Vapore acquoso [g·h ⁻¹]	CO ₂ [g·h ⁻¹]	Attività umana [met]
	(convezione) [W]	(irraggiamento) [W]			
0	65	33	38	13	0,8
7,5	71	36	38	14	0,8
8	82	41	113	32	1
8,5	261	131	299	60	1,2
9	100	50	49	30	1
10	100	50	235	30	1
10,5	100	50	710	30	1
11	100	50	49	30	1
12	273	137	49	60	1,2
12,5	100	50	224	60	1,2
13	0	47	47	32	1
14	261	131	27	29	1
14,5	88	44	27	29	1
15,5	100	50	49	35	1
18	325	163	224	60	1,2
18,5	135	68	224	60	1,2
19	163	82	49	60	1
20	176	88	38	29	1
20,5	172	86	38	29	1
21	150	75	38	32	1
22	174	87	306	32	1
22,5	174	87	358	32	1
23	65	33	38	13	0,8

Tabella 7.1. Profilo giornaliero del calore ceduto per convezione e irraggiamento, nonché del vapore acqueo e dell'anidride carbonica emesse da una persona. I dati, relativi ad attività domestiche, sono desunti dalla raccolta contenuta nel programma WUFI Plus.

Per ognuna delle configurazioni modellate (cfr. par. 7.4) si sono svolte due simulazioni, in assenza e in presenza d'impianti. La prima mira a indagare il contributo dell'involucro e degli eventuali miglioramenti al benessere termico negli ambienti interni. La seconda è volta a calcolare il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione. In questo caso si è combinato l'impiego dell'impianto con la ventilazione naturale, prevedendo che in inverno il riscaldamento non possa essere in funzione nell'ora quotidiana in cui gli infissi sono parzialmente aperti per il ricambio d'aria²⁵; per l'estate si è assunto che si ricorra nelle ore notturne alla sola ventilazione naturale, di giorno al condizionamento dell'aria²⁶.

7.4 Configurazioni simulate

Per i tre edifici esaminati si sono simulate le prestazioni termiche corrispondenti alla configurazione attuale, nell'ipotesi di stato ordinario di manutenzione, e quelle relative a diverse ipotesi di miglioramento. Lo studio della prima costituisce il riferimento per valutare gli incrementi prestazionali conseguibili nelle seconde, facendo riferimento sia al fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento, sia al numero di ore in cui la temperatura non corrisponde a condizioni di benessere (cioè è esterna all'intervallo fra 20°C e 26°C). Si sono indagate due ipotesi di miglioramento. L'una consiste in interventi già diffusi o facilmente integrabili nel recupero degli edifici storici e comprende l'isolamento e la ventilazione della chiusura contro terra e della copertura, il miglioramento dei solai di piano e l'aumento di tenuta all'aria e resistenza termica degli infissi esistenti. L'altra considera anche l'isolamento delle murature, intervento più consistente ma anche più condizionato dalle esigenze di tutela; si analizzano in particolare l'impiego di un intonaco termoisolante sul paramento interno o su quello esterno e l'applicazione di un sistema "a cappotto" interno. Inoltre si è valutata l'interazione fra questi interventi e misure che favoriscono il benessere estivo negli edifici a scapito di quello invernale, ovvero l'impiego di vetri selettivi per ridurre il coefficiente SHGC a 0,30, e l'applicazione sul manto di copertura di una pittura riflettente, che riduca l'assorbimento di radiazione solare a 0,30.

Questo schema di analisi, comune ai tre edifici, è stato specificato sulla base dei caratteri di ciascuno di questi (fig. 7.26). Infatti, in base ai rilievi consultati, nelle costruzioni esaminate per le categorie 1.I e 2.II l'ultima elevazione è separata dallo spazio sotto tetto da un controsoffitto. Per entrambe si sono confrontati i miglioramenti conseguibili con l'isolamento della copertura e con quello all'estradosso del controsoffitto²⁷. Poiché però sono molti gli edifici in cui lo spazio sotto tetto è abitato, per il "catoio" di vicolo della Madonna (1.I) si sono svolte simulazioni anche nell'ipotesi che manchi il controsoffitto.

Una seconda differenza discende dal numero di fronti che per ogni costruzione sono esposte all'ambiente esterno. L'edificio di vicolo della Madonna, infatti, è intercluso su tre lati²⁸; il "catoio" di via Argenteria si affaccia su due strade contrapposte, una delle quali di larghezza molto contenuta; infine il palazzetto di via Bara è alla testa di un isolato e le tre fronti libere si aprono una su una vasta piazza, una su strada e una su uno stretto vicolo. Per i due edifici con più di un affaccio, si sono confrontati gli esiti dell'isolamento termico delle singole fronti e quello di tutte le murature esterne. Nel caso dell'edificio di via Argenteria quest'analisi è stata condotta anche per l'impiego dei vetri selettivi.

Un'ultima differenza di rilievo è legata ai maggiori vincoli d'intervento sull'edificio di via Bara, dettati dagli elementi architettonici di pregio delle fronti esterne e dalla presenza di controsoffitti voltati in alcuni ambienti interni. Anche in questo caso si sono analizzate le possibilità di miglioramento energetico connesse a un uso esteso dell'isolamento sulle tre fronti. Queste, sebbene non accettabili, sono state esaminate per confrontarle con le prestazioni conseguibili nell'ipotesi di un impiego potenzialmente ammissibile dell'isolamento, con la sola applicazione interna e l'esclusione del sistema a pannelli negli ambienti voltati (cfr. par. 7.5.2).

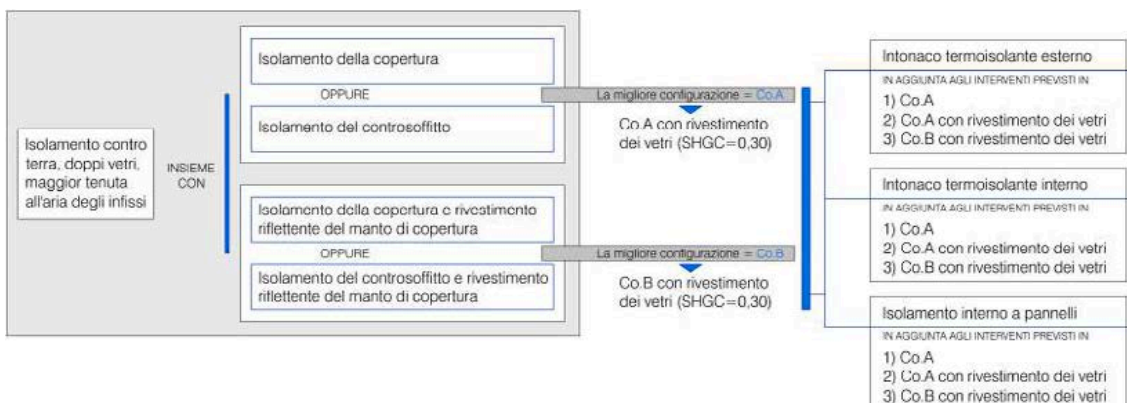


Figura 7.24. Simulazioni relative all'edificio in vicolo della Madonna a partire dalle sue prestazioni iniziali.

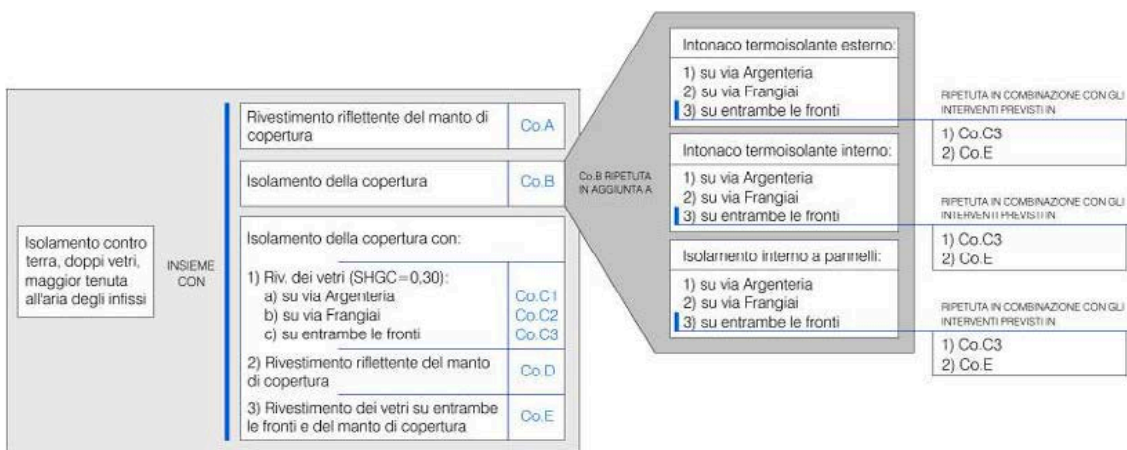


Figura 7.25. Simulazioni relative all'edificio in via Argenteria a partire dalle sue prestazioni iniziali.

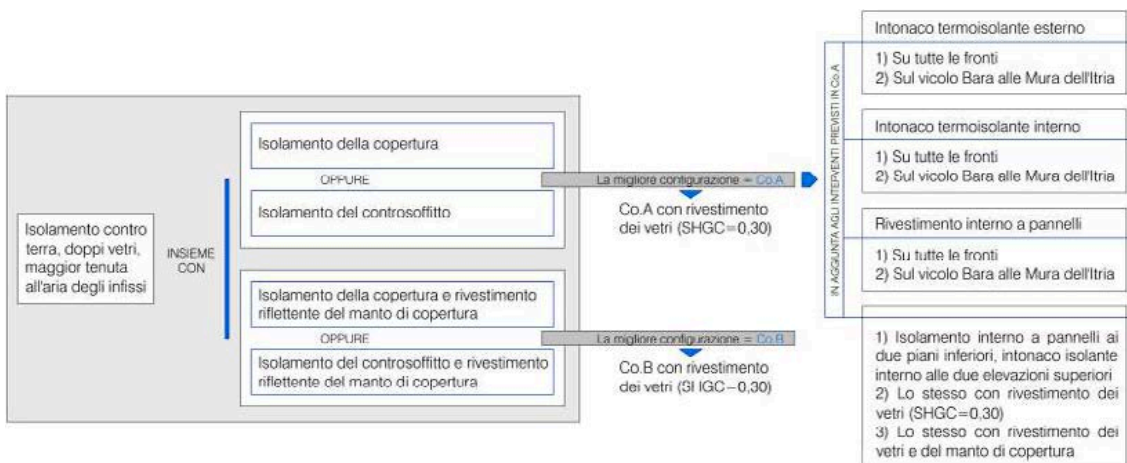


Figura 7.26. Simulazioni relative all'edificio in via Bara all'Olivella a partire dalle sue prestazioni iniziali.

7.5. Risultati

7.5.1 Prestazioni attuali e miglioramenti di semplice applicazione

Le simulazioni svolte mostrano, per i tre edifici indagati, condizioni termiche distanti da quelle di benessere sia nel periodo invernale sia in quello estivo. Nel primo, è consistente il numero di ore nelle quali la temperatura interna è inferiore a 20°C. Come media fra le zone termiche in cui ciascun edificio è suddiviso, esso corrisponde al 41,3% del periodo esaminato per il “catoio” di vicolo della Madonna, al 47,3% per quello di via Argenteria, al 40,5% per il “palazzetto” di via Bara all'Olivella.

Agli ultimi piani delle tre costruzioni gli apporti solari mitigano queste condizioni di *discomfort* ma sono compensati negativamente dal minor spessore delle chiusure verticali, cui corrispondono maggiori scambi termici con l'esterno. Infatti la durata del periodo in cui la temperatura interna è inferiore a 20°C si mantiene pari al 37,7%, 51% e 40% nell'ordine in cui i tre edifici sono stati citati. Il problema, ovviamente, è più acuto quando la struttura di copertura delimita direttamente gli spazi in cui garantire il benessere degli occupanti. All'ultima elevazione del “catoio” in vicolo della Madonna, infatti, la percentuale cresce dal 37,7% al 40,2% nelle simulazioni svolte senza controsoffitto²⁹.

Durante il periodo estivo, il ricorso alla ventilazione naturale e ai dispositivi di ombreggiamento garantisce in una certa misura condizioni interne di benessere. Gran parte dei valori di temperatura operativa desunti dalle simulazioni rispetta infatti il criterio di benessere termico proposto dalla norma UNI EN 15251:2008³⁰ (figg. 7.27-7.32). Tuttavia, per valutare le effettive condizioni di *comfort* interno, i valori di temperatura devono essere messi in relazione con l'umidità relativa degli ambienti, la quale si scosta debolmente da quella esterna per via del consistente ricorso alla ventilazione naturale previsto nelle simulazioni.

Invece il limite di benessere per gli ambienti residenziali climatizzati, 26°C, è superato mediamente nel 20% del periodo di simulazione per l'edificio di vicolo della Madonna, nel 18,7% per la costruzione di via Argenteria e nel 19,5% per quella di via Bara. Alle ultime elevazioni dei tre edifici tali percentuali si mantengono simili, essendo pari rispettivamente al 24% (anche in assenza di controsoffitto), al 18,5% e al 20%.

Negli spazi delle tre costruzioni destinati alle unità abitative, infine, il fabbisogno termico complessivo risulta pari a 4.424 kWh annui per il “catoio” di categoria 1.I (3.267 kWh per il riscaldamento e 1.157 kWh per il raffrescamento), a 15.274 kWh per quello di categoria 1.II (12.464 kWh e 2.810 kWh), a 19.224 kWh per il “palazzetto” rappresentativo della categoria 2.II (13.412 kWh e 5.812 kWh). Questi corrispondono, rispettivamente, a circa 40 kWh·m⁻², 45 kWh·m⁻² e 49 kWh·m⁻² annui. Per l'edificio di via Argenteria, in particolare, all'unità abitativa degli ultimi due piani corrisponde il 71% del fabbisogno energetico (sempre escludendo il piano terra); nell'edificio di via Bara, invece, il 51%.

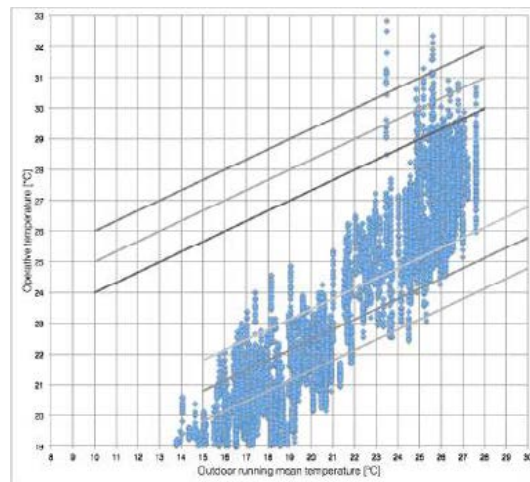
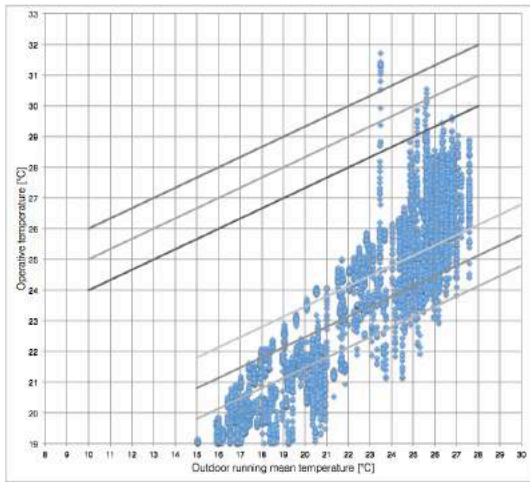


Figure 7.27, 7.28. Temperatura operativa in funzione di quella media esterna per le zone 3 (a sinistra) e 7 (a destra) dell'edificio in vicolo della Madonna.

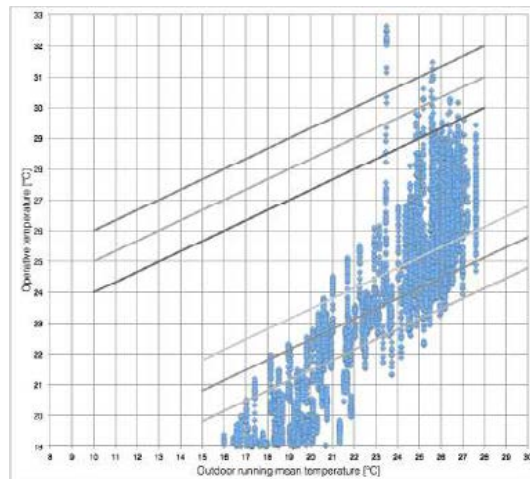
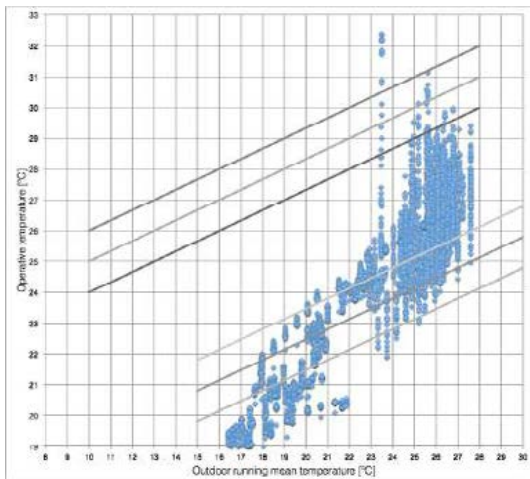


Figure 7.29, 7.30. Temperatura operativa in funzione di quella media esterna per le zone 4 (a sinistra) e 8 (a destra) dell'edificio in via Argenteria.

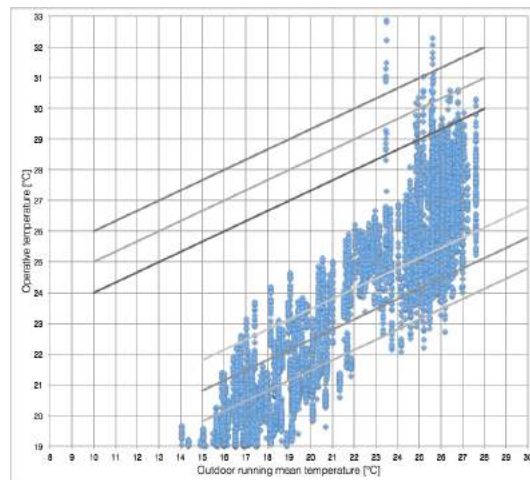
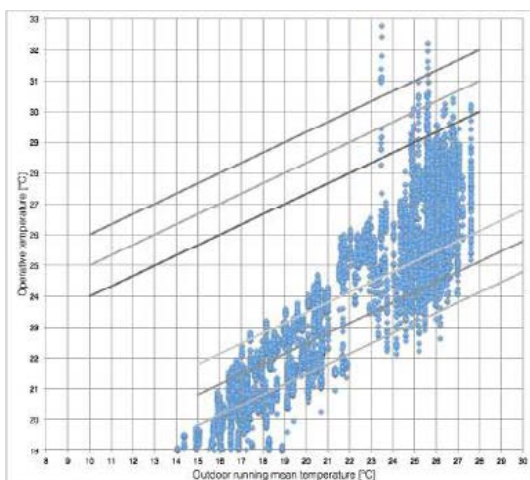


Figure 7.31, 7.32. Temperatura operativa in funzione di quella media esterna per le zone 4 (a sinistra) e 8 (a destra) dell'edificio in via Bara all'Olivella.

Interventi facilmente integrabili o già diffusi nel recupero dell'architettura storica, come l'isolamento delle coperture e il miglioramento degli infissi, possono contribuire in modo significativo a controllare le condizioni termiche all'interno degli edifici esaminati. Il periodo complessivo in cui la temperatura interna è inferiore a 20°C, infatti, si riduce in media in misura pari al 12% per la costruzione del gruppo 1.I, al 9,4% per quella del gruppo 1.II, al 7% per quella del gruppo 2.II. Per il periodo estivo, invece, le simulazioni indicano un leggero incremento del numero di ore di surriscaldamento (3%, 4% e 2,4% rispettivamente). Questo si verifica nei mesi di maggio e ottobre, durante i quali la maggior tenuta all'aria degli infissi ostacola lo smaltimento del calore accumulato all'interno degli ambienti. A ciò potrebbe ovviarsi con un ricorso alla ventilazione naturale più consistente rispetto a quello previsto nelle simulazioni, nelle quali, come prima si è sottolineato (cfr. par. 7.3.4), essa è stata mantenuta invariata in tutte le configurazioni.

Gli interventi esaminati (miglioramento degli infissi e isolamento della copertura) limitano sensibilmente il fabbisogno energetico dei tre edifici. Nel "catoio" di vicolo della Madonna si registra una riduzione del consumo energetico complessivo pari al 32,2%, ovvero al 37,4% per il riscaldamento e al 20,2% per il condizionamento. Ai primi due piani abitati la riduzione, dettata essenzialmente dal miglioramento degli infissi³¹, è del 24%, mentre all'ultimo piano raggiunge il 39,2 % nel caso d'isolamento della struttura di copertura (soluzione adottata per le simulazioni successive) e il 39,7% qualora l'isolamento sia disposto sul controsoffitto. Nelle simulazioni condotte in assenza di controsoffitto, invece, i benefici connessi all'isolamento della copertura sono ancora più consistenti, in quanto consentono, all'ultima elevazione, di ridurre il fabbisogno del 58% (62% per il riscaldamento invernale e 52% per il raffrescamento estivo).

Per l'edificio di via Argenteria il fabbisogno energetico si riduce complessivamente del 37% (38,8% e 28,9%); per l'unità abitativa che occupa il secondo e il terzo piano (cioè le zone termiche 3, 4, 5 e 6 del modello) il miglioramento degli infissi permette una diminuzione del 15,5%. La riduzione è molto più consistente, 45,8%, per l'unità abitativa soprastante (zone 7, 8 e 9).

Nell'edificio di via Bara, infine, il fabbisogno di energia termica per ciascuna unità immobiliare si riduce del 15,7% (16,4% per il riscaldamento e 14,3% per il raffrescamento) per l'unità immobiliare più bassa, del 13,8% (12,7% e 16,2%) per quella intermedia. Per l'ultima elevazione le simulazioni indicano come più consistenti i benefici dell'isolamento del controsoffitto rispetto a quelli della copertura, con una riduzione del 42,6 % (44,2% e 38,8%) anziché del 34,9% (33,2% e 39,1%). La prima soluzione è stata dunque mantenuta per le successive simulazioni.

7.5.2 Isolamento delle murature

Confrontando gli effetti delle applicazioni interna ed esterna dell'intonaco termoisolante, come atteso, la seconda è preferibile alla prima dal punto di vista del comportamento passivo dell'involucro. In termini di fabbisogno energetico, tuttavia, i suoi benefici sono

maggiori nel periodo invernale; invece d'estate l'annullamento degli effetti della massa termica da parte del rivestimento isolante interno è compensata dalla rapidità di raffreddamento degli ambienti.

Per l'edificio di vicolo della Madonna, nel quale solo una fronte architettonica lunga 6,3 m è esposta all'esterno, le simulazioni svolte indicano che, in unione al miglioramento degli infissi e all'isolamento della copertura, l'applicazione di un intonaco a bassa conducibilità termica ($\lambda=0,086 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) al paramento esterno ridurrebbe il fabbisogno di energia per la climatizzazione del 42,1%, e in particolare del 53% per il riscaldamento e del 17% per il condizionamento. I benefici associati all'isolamento del paramento interno, invece, sono del 39,9% (48,9% e 18,9%) per l'intonaco e del 47,6% (61,5% e 15,2%) per il sistema a pannelli. Per quest'ultimo la maggior riduzione del fabbisogno energetico è legata alla possibilità di applicare spessori più consistenti di materiale isolante e riguarda, dunque, le murature di sezione contenuta, mentre le differenze prestazionali rispetto agli intonaci sono più limitate per le pareti di spessore maggiore.

Per l'edificio del gruppo 1.II, nel quale le superfici esposte all'esterno sono due (estese in lunghezza per circa 10 m su via Argenteria e 10,7 m su via dei Frangiai), nell'ipotesi di applicazione dell'isolante a uno solo dei paramenti³², il contenimento del fabbisogno di energia per la climatizzazione mostra risultati paragonabili, cioè il 44% sia per l'intonaco esterno (47% per il riscaldamento e 31,5% per il condizionamento) sia per quello interno (47% e 28%), il 51% (56% e 27%) per i pannelli³³. Nel caso di applicazione su entrambi i paramenti, invece, l'intonaco esterno diminuisce il fabbisogno termico del 48,7% (52,5% e 32,1%), quello interno del 48,3% (52,6% e 29,0%), il sistema a pannelli del 61,0% (68,3% e 28,6%).

Per il "palazzetto" di via Bara, l'isolamento termico di tutte le fronti architettoniche determinerebbe una riduzione del fabbisogno energetico complessivo delle unità abitative pari al 39,4% (43,0% per il riscaldamento e 30,9% per il raffreddamento), al 38,2% (44,7% e 23,5%) e al 48,3% (59,8% e 21,6%) rispettivamente per le tre soluzioni d'isolamento. Anche in questo caso, i risultati più consistenti sarebbero conseguiti con il sistema a pannelli ai piani superiori, per via del maggior spessore d'isolamento³⁴. Tuttavia, l'applicazione di un intonaco termoisolante su tutte le fronti esterne dell'edificio è certamente incompatibile con la conservazione del paramento, caratterizzato per gran parte della sua estensione da fregi, intonaci bugnati e listati. Analogamente, il ricorso al rivestimento interno con pannelli trova ostacoli geometrici nella presenza di controsoffitti voltati, di cui i rilievi consultati attestano la presenza ai piani superiori.

Questa soluzione, infatti, è stata adoperata come metro di confronto per due ipotesi d'intervento potenzialmente praticabili. La prima, più restrittiva, prevede la possibilità di isolare la sola fronte sul vicolo Bara alle Mura dell'Itria, che all'esterno è priva di elementi di pregio e sulla quale insistono, in base agli elaborati di progetto, per lo più ambienti di servizio. In questo caso, il fabbisogno energetico dell'edificio si ridurrebbe del 32% o del 36% a seconda dell'impiego d'intonaco a bassa conducibilità (interno o esterno) oppure di un sistema a pannelli. Nella seconda ipotesi, meno restrittiva, si è supposto invece che

i vincoli formali e materici dell'edificio consentano l'applicazione dei pannelli in sughero espanso alle prime due elevazioni dell'edificio e sull'intera parete verso il vicolo Bara alle Mura dell'Itria; il ricorso all'intonaco termoisolante interno per le murature restanti³⁵. Con

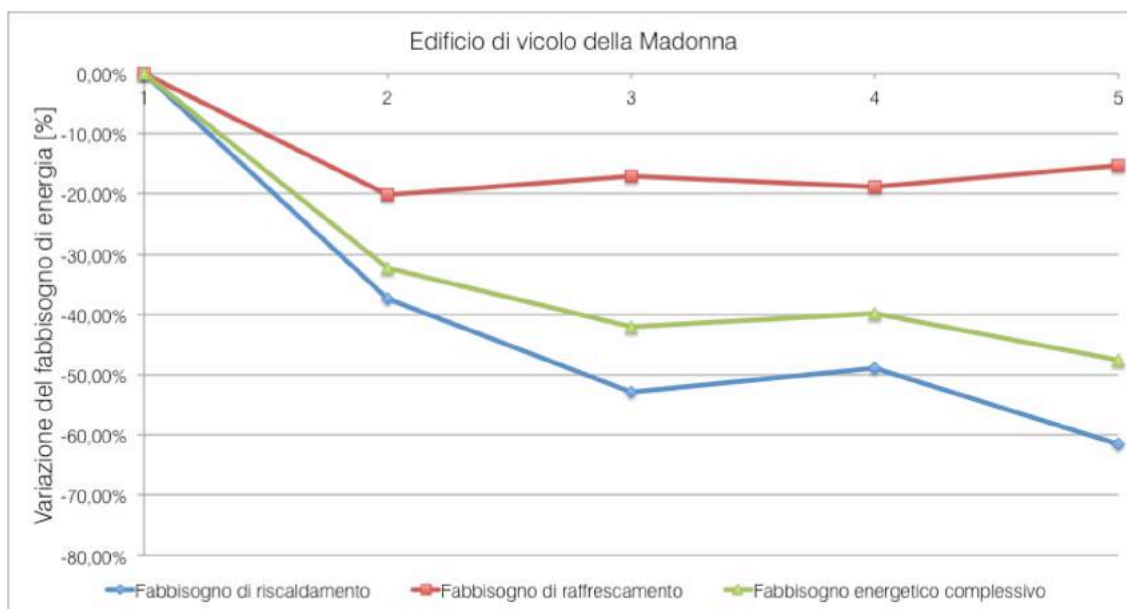


Figura 7.33. Riduzione del fabbisogno energetico per l'edificio di vicolo della Madonna (categoria 1.). L'origine fa riferimento alle prestazioni attuali dell'edificio, il numero 2 agli interventi di miglioramento facilmente integrabili, il 3 all'intonaco termoisolante esterno, il 4 a quello interno, il 5 all'isolamento interno a pannelli.

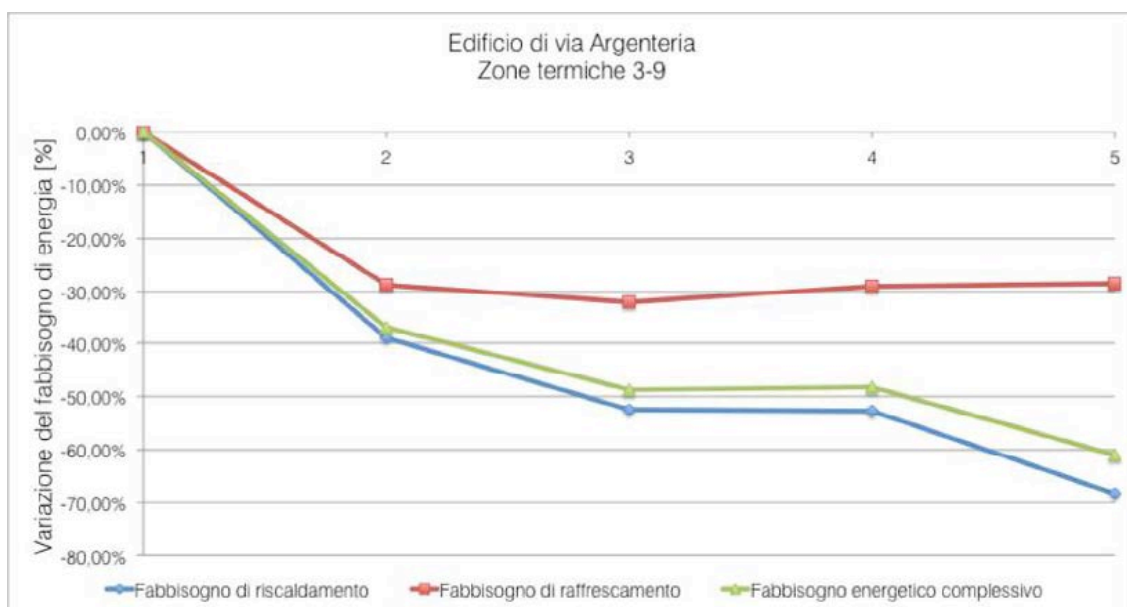


Figura 7.34. Riduzione percentuale del fabbisogno di energia per entrambe le unità abitative dell'edificio di via Argenteria. Anche in questo caso l'origine del diagramma corrisponde alle prestazioni attuali dell'edificio, il numero 2 al miglioramento conseguente a interventi facilmente integrabili, il 3 agli effetti dell'intonaco termoisolante esterno, il 4 a quello interno, il 5 all'isolamento interno a pannelli.

questi interventi il fabbisogno termico complessivo dell'edificio si ridurrebbe del 43,8% (53,3% per il riscaldamento e 22,0% per il condizionamento).

Anche le misure d'isolamento termico delle pareti accrescono il numero di ore nelle qua-

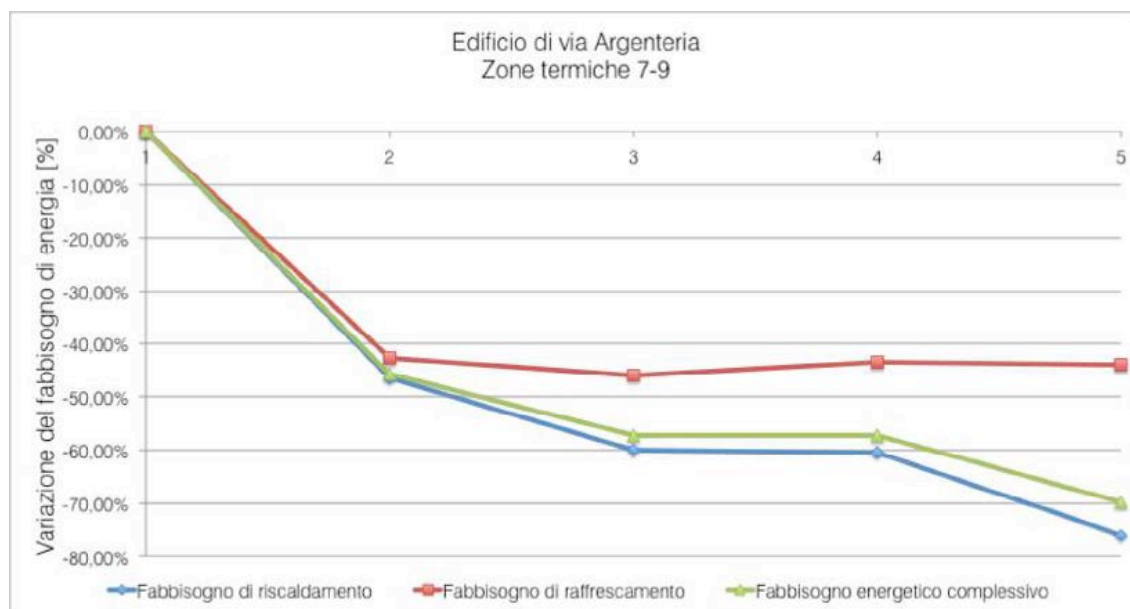
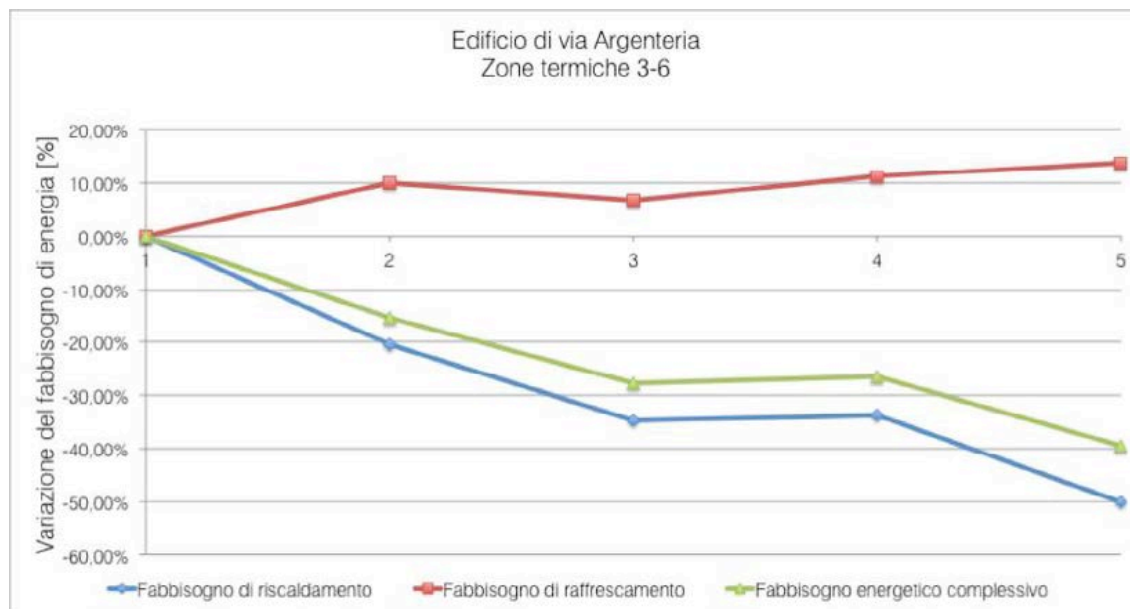


Figure 7.35, 7.36. Riduzione percentuale del fabbisogno di energia per l'edificio di via Argenteria. I grafici si riferiscono: all'unità che occupa il primo e il secondo piano (*in alto*); a quella che occupa le ultime due elevazioni (*in basso*). Anche in questo caso l'origine del diagramma corrisponde alle prestazioni attuali dell'edificio, il numero 2 al miglioramento conseguente a interventi facilmente integrabili, il 3 agli effetti dell'intonaco termoisolante esterno, il 4 a quello interno, il 5 all'isolamento interno a pannelli.

li la temperatura interna supera i 26°C nei mesi intermedi fra quelli invernali ed estivi, in particolare a maggio, giugno e ottobre. Per tutti e tre gli edifici, si registrano incrementi compresi fra il 5% e il 15% circa³⁶, a seconda della soluzione tecnica adottata; in particola-

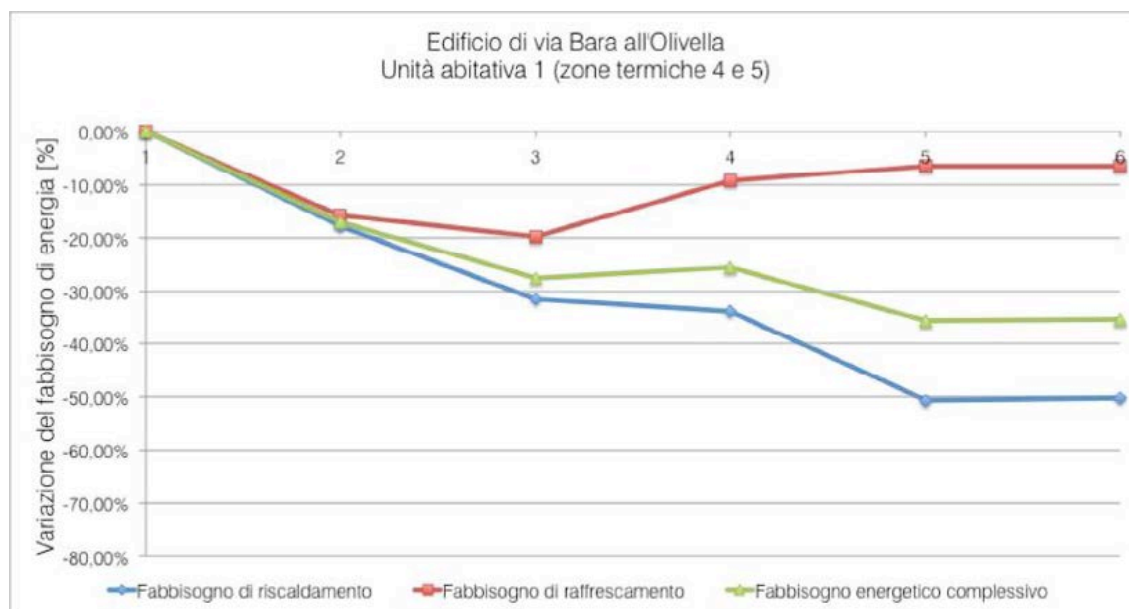
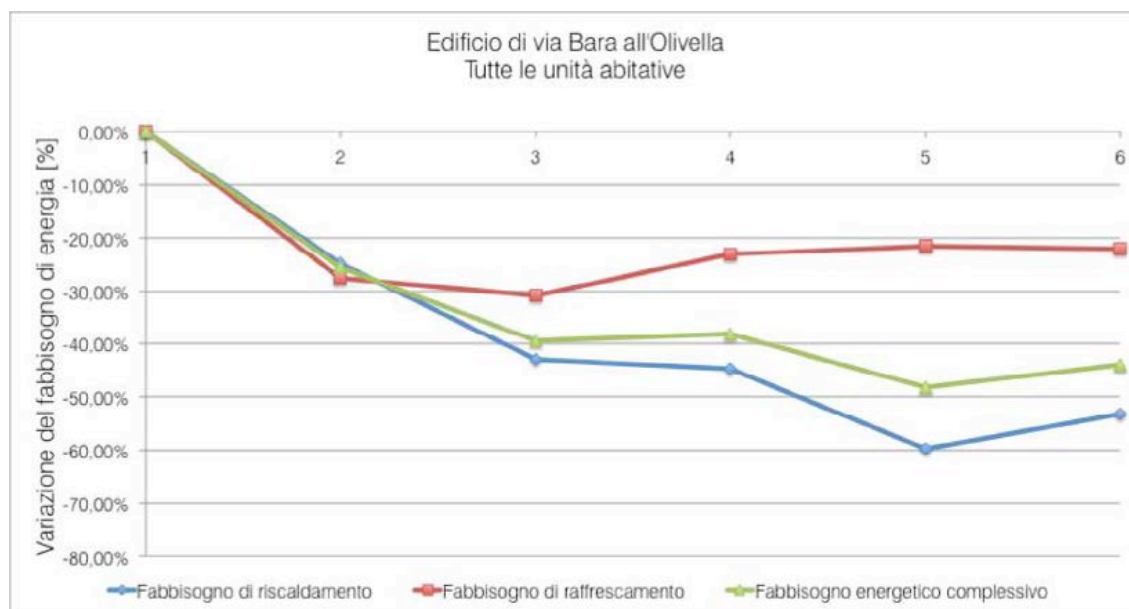


Figure 7.37, 7.38. Variazione percentuale del fabbisogno di energia per l'edificio di via Bara all'Olivella (*in alto*, l'insieme delle tre unità abitative; *in basso*, l'abitazione del primo piano). L'origine del diagramma corrisponde alle prestazioni attuali dell'edificio, il numero 2 al miglioramento conseguente a interventi facilmente integrabili, il 3 agli effetti dell'intonaco termoisolante esterno, il 4 a quello interno, il 5 all'isolamento interno a pannelli. Il 6, infine, si riferisce alla configurazione nella quale si ricorre contestualmente all'intonaco termoisolante e al rivestimento interno a pannelli.

re, l'incremento maggiore si ha con l'applicazione del rivestimento interno a pannelli.

Nuovamente, andrebbe indagata la possibilità di mitigare tale effetto attraverso un controllo della ventilazione naturale diverso da quello simulato.

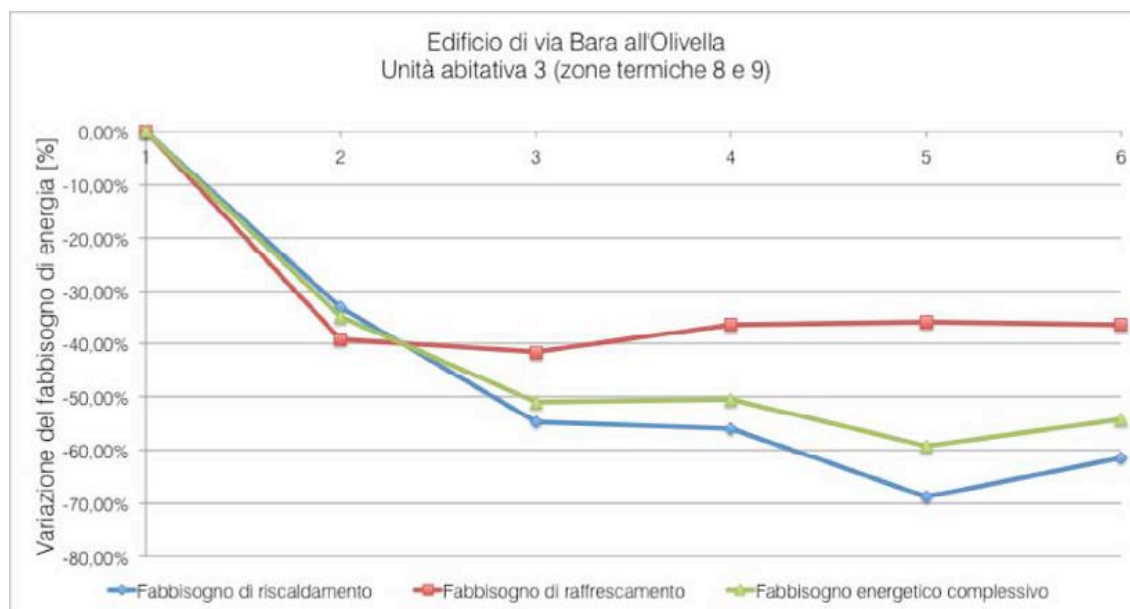
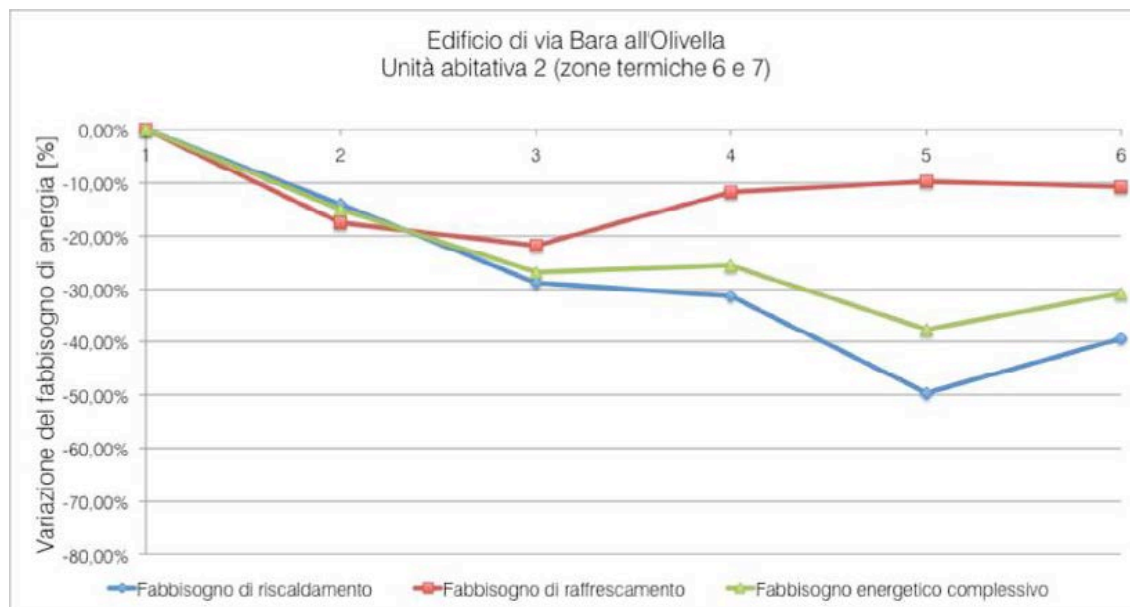


Figure 7.39, 7.40. Variazione percentuale del fabbisogno di energia per l'edificio di via Bara all'Olivella (*in alto* l'unità abitativa del secondo piano, *in basso* quella del terzo). Anche in questo caso l'origine del diagramma corrisponde alle prestazioni attuali dell'edificio, il numero 2 al miglioramento conseguente a interventi facilmente integrabili, il 3 agli effetti dell'intonaco termoisolante esterno, il 4 a quello interno, il 5 all'isolamento interno a pannelli. Il 6, infine, si riferisce alla configurazione nella quale si ricorre contestualmente all'intonaco termoisolante e al rivestimento interno a pannelli.

7.5.3 Mitigazione del surriscaldamento estivo

Il ricorso a vetri a più basso fattore solare ($SHGC=0,30$) e a rivestimenti riflettenti per il manto di copertura consente di ridurre in misura anche notevole il fabbisogno energetico degli edifici per il condizionamento, ma a prezzo di un innalzamento sensibile dell'energia necessaria per il riscaldamento invernale. Peraltro l'utilizzo delle persiane per ridurre gli apporti di energia solare durante il periodo estivo, previsto nelle simulazioni svolte, limita l'efficacia dell'intervento sui componenti trasparenti; questa andrebbe dunque analizzata in base alla relazione tra le caratteristiche di controllo solare dei vetri, le esigenze invernali ed estive, la qualità luminosa degli ambienti interni, ma anche con riferimento ai casi, non rari nell'architettura storica di Palermo, in cui i serramenti siano muniti soltanto di scuri interni.

Anche il rivestimento riflettente del manto di copertura può costituire una misura di notevole efficacia nel periodo estivo, soprattutto per contenere il fabbisogno energetico per il condizionamento degli spazi sotto tetto abitati e limitarne il rischio di surriscaldamento. Al contempo, tuttavia, il minor apporto di energia solare determina maggiori consumi durante il periodo di riscaldamento.

Tenendo conto degli edifici circostanti e adoperando il diagramma solare per Palermo, il rivestimento selettivo dei vetri è stato ipotizzato per i serramenti esposti in modo consistente all'irraggiamento solare, dunque per le ultime due elevazioni nel caso dei "catoì" di vicolo della Madonna e via Argenteria; per il "palazzetto", invece, l'impiego del rivestimento è stato simulato su tutti gli infissi prospicienti via Maqueda e via Bara. Nelle tre costruzioni i benefici che si ottengono in termini di riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento sono compresi fra il 10 % e il 25 %, ma sono compensati da un equivalente innalzamento del fabbisogno per il riscaldamento. Una tendenza analoga si è registrata per l'applicazione del rivestimento riflettente sul manto di copertura, i cui effetti sono ovviamente più consistenti in assenza di controsoffitto. Infatti, nell'edificio di via Bara all'Olivella, esso produce, all'ultima elevazione, una riduzione del 4 % del fabbisogno energetico per il condizionamento, a parità delle altre misure di miglioramento. Invece nell'edificio di via Argenteria, così come in quello di vicolo della Madonna (nelle simulazioni in cui è privo di controsoffitto sotto tetto), all'ultimo piano il risparmio energetico risulta raddoppiato, mentre si riduce debolmente se il rivestimento riflettente è applicato in alternativa all'isolamento.

Questi risultati, come quelli relativi agli altri interventi simulati, hanno un valore puramente indicativo, per l'assenza di indagini diagnostiche sui tre edifici e la conseguente impossibilità di calibrazione dei modelli. Tuttavia, soprattutto nella prospettiva che si costruiscano raccolte di riferimento a livello locale sui numerosi parametri necessari per lo svolgimento di simulazioni accurate, l'applicazione ai tre edifici esaminati dimostra come l'analisi e la comparazione dei caratteri generali del costruito storico locale, attraverso lo studio di costruzioni rappresentative, possa essere una strada proficua per definire linee d'indirizzo volte a un miglioramento compatibile delle sue prestazioni energetiche.

Note

¹ Come per gli altri due edifici, questi dati geometrici non sono ricavati dai rilievi di dettaglio ma discendono dall'analisi per categorie condotta sulla cartografia del centro storico.

² La norma UNI 11300-1:2014 definisce la "zona termica" come la "parte dell'ambiente climatizzato mantenuta a temperatura (ed eventualmente umidità) uniforme attraverso lo stesso impianto di climatizzazione".

³ Le modifiche riguardano principalmente la seconda elevazione, che nella parte oggetto di simulazione è suddivisa peraltro in due unità edilizie; si è riproposta quindi una distribuzione analoga a quella delle altre elevazioni. Inoltre, non essendo stato possibile svolgere un sopralluogo interno, si è tralasciata la chiostrina che, negli elaborati del progetto di recupero citato in Di Benedetto (2000), è presente a partire dalla seconda elevazione. Essa indubbiamente contribuisce alla ventilazione naturale degli ambienti, in relazione alle aperture presenti e all'effettiva distribuzione degli spazi interni.

⁴ I dati dell'Osservatorio sono stati consultati presso il sito <http://meteo.astropa.unipa.it/public/> (ultima consultazione in data 01.03.2015).

⁵ Si ringrazia il dottor Thomas Schmidt del *Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (Standort Holzkirchen)*, che adoperando i dati meteorologici dell'Osservatorio astronomico di Palermo ha elaborato il *file* (formato .wac) impiegato per le simulazioni in WUFI® Plus.

⁶ Questi dati, consultati nell'ottobre 2015, sono disponibili al sito <http://www.scia.isprambiente.it/>.

⁷ Questo valore è paragonabile a quelli registrati durante altri sette giorni dell'anno, concentrati per lo più a dicembre. Solo in un caso, il 28 dicembre, si è registrato un valore sensibilmente minore, pari a $44 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

⁸ I valori orari massimi dell'irraggiamento sono concentrati tutti fra i mesi di maggio e luglio.

⁹ Si è tralasciato il 28 dicembre, per il quale il valore scende a $24 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ rispetto alle ventiquattro ore).

¹⁰ Per le malte da muratura i valori di conducibilità desumibili dalle norme variano fra $0,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $0,90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

¹¹ I valori dei coefficienti di assorbimento e di emissività adoperati per tutte le superfici esterne sono quelli suggeriti dal programma *WUFI Plus* in relazione ai vari materiali e alle loro caratteristiche superficiali.

¹² Il valore di $\lambda_{10,\text{dry,mat}}$ considerato è il frattile del 50%, che la norma consiglia per i calcoli a supporto della Direttiva sulle prestazioni energetiche degli edifici, in quanto questi si basano sulla resistenza termica media degli elementi per muratura.

¹³ Il D.M. 26.06.2015 ha ridotto il limite a $0,45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dal 01.10.2015 e a $0,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dal 01.01.2021.

¹⁴ Il D.M. 26.06.2015 ha ridotto il limite a $0,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dal 01.10.2015 e a $0,32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dal 01.01.2021.

¹⁵ Un miglioramento prestazionale è stato proposto, nelle simulazioni condotte, anche per i solai di piano, sebbene questi incidano sulle prestazioni energetiche di un edificio solo quando lo separano da spazi con differenti condizioni termiche. In particolare si è supposta l'applicazione di un tavolato d'irrigidimento in legno d'abete dello spessore di 2 cm, sul quale sia gettato un massetto di 6 cm con aggregati di argilla espansa.

¹⁶ Questa scelta si può ritenere cautelativa. Sebbene siano attestati telai di spessore inferiore a 5 cm, in molti casi il telaio fisso ha uno spessore molto maggiore poiché su di esso sono incardinate anche le ante delle persiane.

¹⁷ Per gli ambienti di piano terra dei due "catoì", si sono considerati infissi lignei con specchiature in vetro, chiudibili per mezzo di scuretti in legno. Per il "palazzetto", invece, anche nell'analisi dello stato di fatto, per via della vocazione commerciale dei locali di piano terra si sono mantenuti gli attuali serramenti metallici, caratterizzati da un'elevata percentuale della superficie vetrata. Per il "catoio" in vicolo della Madonna, inoltre, l'apertura esterna dell'ambiente di piano terra, attualmente tamponata, è stata considerata aperta.

¹⁸ Come rilevano Culotta et al. (1998), le specchiature erano realizzate generalmente in abete, cioè in legno tenero, per cui il valore di conducibilità termica adottato è cautelativo.

¹⁹ Tali indicazioni sono riportate al paragrafo E.1 dell'allegato E della norma ISO 10077-1:2006.

²⁰ Il diagramma è stato consultato presso il sito <http://www.solaritaly.enea.it>.

²¹ Quanto agli scuretti degli infissi di piano terra, si è connesso il loro utilizzo non a funzioni di ombreggiamento (si è posto nullo il relativo fattore) ma d'illuminazione. In particolare si è assunto che, durante tutto l'anno, essi siano mantenuti aperti durante le ore diurne e chiusi di notte. Per le ore notturne gli si è attribuita, dunque, una resistenza termica aggiuntiva di $0,08 \text{ m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$, pari a quella che la ISO 10077-1:2006 assegna ai dispositivi di ombreggiamento di elevata permeabilità.

²² È richiesto anche un coefficiente adimensionale, detto *discharge coefficient*, che è legato agli effetti dinamici del flusso d'aria attraverso un'apertura. Esso rende conto di una riduzione del flusso teorico dovuto a fenomeni turbolenti e, per aperture a spigolo vivo, è generalmente stimato pari a 0,6, valore impiegato anche per le simulazioni qui esposte.

²³ Più in dettaglio, nella seconda simulazione preliminare si è posto che gli infissi siano completamente aperti nelle ore in cui la temperatura interna di ciascuna zona termica superi 25°C; si è ipotizzato che la superficie aperta sia la metà nelle ore notturne, per tener conto dell'ostruzione delle persiane. Infine, per il periodo invernale si è assunto che, durante un'ora della mattina, i serramenti siano aperti per il 10% della loro superficie per il ricambio d'aria.

²⁴ A seconda della pressione atmosferica e della velocità del vento, nel periodo estivo il ricambio d'aria raggiunge valori orari elevati (da 30 h⁻¹ nel "catoio" di vicolo della Madonna a 80 h⁻¹ per il "palazzetto" di via Bara); per ottimizzare le condizioni di benessere, che non dipendono solo dalla temperatura ma anche da altri fattori, fra i quali la velocità dell'aria, sarebbe opportuno definire in modo più accurato l'apertura dei serramenti nelle simulazioni.

²⁵ L'analisi delle prestazioni degli edifici connesse a un funzionamento esclusivamente diurno dell'impianto di riscaldamento potrebbe costituire un approfondimento dello studio.

²⁶ Nelle simulazioni dei tre edifici, l'impianto di riscaldamento è attivo nei periodi 01.01.2014-31.03.2014 e 01.12.2014-01.01.2015. L'impianto entra in funzione istantaneamente quando la temperatura interna scende al di sotto del "valore di progetto", fissato a 20°C. Non è attivo dalle ore 7 alle 8 del mattino, quando è prevista la ventilazione naturale degli ambienti.

Il periodo di condizionamento, invece, dipende dall'andamento di temperatura evidenziato nel simulare le prestazioni attuali degli edifici. Per la costruzione in vicolo della Madonna l'impianto è attivo (dalle ore 8 alle 23) nel periodo 14.06.2014-24.09.2014, per quella in via Argenteria dal 15.06.2014 al 26.09.2014, per il "palazzetto" di via Bara dal 10.06.2014 al 16.06.2014 e dal 24.06.2014 al 26.09.2014.

²⁷ Sia nel caso in cui l'isolamento sia applicato all'estradosso del controsoffitto, sia alla copertura, si è mantenuta nello spazio sotto tetto una ventilazione di 0,3 h⁻¹, volta a garantire la conservazione delle strutture lignee.

²⁸ Nelle simulazioni svolte, per le murature di confine con gli edifici limitrofi si è assunto che la superficie esterna sia esposta a condizioni termiche e igrometriche analoghe a quelle interne. Nel caso del "catoio" di vicolo della Madonna, l'edificio che lo costeggia a nord, attualmente in stato di forte degrado, raggiunge una quota leggermente inferiore rispetto alla costruzione analizzata. Tuttavia, per semplicità, si è assunto che per tutta la sua altezza la parete di confine sia esposta ad ambienti interni su entrambi i paramenti.

²⁹ Tuttavia in questo confronto bisogna considerare che l'ultimo piano dell'edificio ha, in assenza di controsoffitto, un volume ben maggiore.

³⁰ Il criterio è proposto dalla norma per dimensionare sistemi passivi volti a contenere il surriscaldamento degli ambienti in condizioni estive. È rivolto infatti ad ambienti privi di sistema meccanico di climatizzazione, nei quali però sia facile per gli occupanti accedere ad aperture apribili e, dunque, controllare le condizioni climatiche interne per mezzo della ventilazione naturale. Il criterio fa riferimento a tre categorie di benessere, i cui limiti sono costituiti da valori di temperatura "adattiva", dipendente cioè non solo dalla temperatura corrente ma anche da quella esterna media dei giorni precedenti; si tiene conto, quindi, dell'adattamento delle persone e della loro sensazione di benessere alle condizioni ambientale.

³¹ Gli scambi d'aria all'interno dell'edificio fanno sì che gli interventi proposti abbiano influenza su tutte le zone termiche, in misura più o meno consistente (e talvolta trascurabile).

³² In tutti i casi analizzati (isolamento su via Argenteria, su via Frangiai o su entrambe), si è mantenuta isolata la parete esposta a Nord-Ovest, che confina con l'edificio limitrofo ma è libera in corrispondenza del piano sotto tetto.

³³ In tutti i casi, il contenimento del fabbisogno energetico è molto maggiore nell'unità abitativa delle ultime due elevazioni (zone termiche 7, 8 e 9) rispetto a quella sottostante (zone 3, 4, 5 e 6). In termini complessivi, infatti, alla prima corrispondono riduzioni del 53% per l'intonaco (sia interno sia esterno) e del 60,5% per il sistema a pannelli; alla seconda rispettivamente del 22% e del 27%.

³⁴ Rispettivamente per le unità immobiliari del primo piano (zone 4 e 5), del secondo (6 e 7) e del terzo (8 e 9), il fabbisogno complessivo si riduce del 27,7 %, del 26,8 % e del 51,0 % applicando un intonaco termoisolante.

te sul paramento esterno; del 25,5 %, 25,5 % e 50,4 % con un intonaco esterno; del 35,7 %, 37,6 % e 59,4 % con il sistema a pannelli applicato internamente.

³⁵ In particolare, in quest'ipotesi d'intervento potenzialmente compatibile si è previsto il ricorso all'isolamento a pannelli nelle prime due elevazioni dell'edificio e dell'intonaco termoisolante interno per le restanti due. I rilievi consultati attestano un solo ambiente voltato all'ultimo piano; la scelta di escludere l'impiego dell'isolamento a pannelli per entrambe le elevazioni è dettata dall'intento di evidenziare quanto la presenza di vincoli geometrici interni (che potrebbero anche consistere in altre decorazioni, ad esempio cornici modanate) possa incidere sui consumi energetici della costruzione.

³⁶ Si tratta di valori medi riferiti a tutte le zone termiche che compongono le unità abitative di ciascuna costruzione.

Bibliografia

Alaimo, R., Giarrusso, R., & Montana, G. (2008). *I materiali dell'edilizia storica di Palermo: Conoscenza per il restauro*. Enna: IlionBooks.

Antretter, F., Fink, M., Pazold, M., Radon, J. & Winkler, M. (2015). *WUFI® Plus 3.0. Manual*. Fraunhofer IBP.

Antretter, F., Radon, J., & Pazold, M. (2013). Coupling of Dynamic Thermal Bridge and Whole-Building Simulation. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference. 1-5 dicembre 2013*.

Antretter, F., F. Sauer, T. Schöpfer, and A. Holm. (2011). Validation of a hygrothermal whole building simulation software. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Convegno tenuto a Sydney, Australia*.

Barbero, S., Dutto, M., Ferrua, C., & Pereno, A. (2014). Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings*, 77, 40-47.

Culotta T., La Franca C., Scianna A. (1998). *Gli infissi del centro storico di Palermo: Indagine tipologica*. Palermo: CNR - Istituto per l'Edilizia e il Risparmio Energetico.

Di Benedetto G. (2000). *La città che cambia: Restauro e riuso nel Centro Storico di Palermo*. Palermo: Comune di Palermo, 2000.

Giovanetti F. (a cura di). (1997). *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Palermo: Flaccovio Editore.

Giuffrè A., & Carocci C. (1999). *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Roma-Bari: Editori Laterza.

Holm, A., Künzel, H. M., & Sedlbauer, K. (2003). The hygrothermal behaviour of rooms: combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. *Proceedings of the 8th International IBPSA Conference. Convegno tenuto a Eindhoven, Paesi Bassi*.

Künzel, H. M. (1994). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components* (Dissertation). University of Stuttgart, Stoccarda, Germania. Consultabile al sito www.building-physics.com.

Marsili, G., Dainese, U., Mazzari, M., Nicoletti, R., Esposti, R., & Panzeri, A. (2014). Cool-roof in restoration projects. In G. Biscontin, & G. Driussi, G. (a cura di), *Scienza e Beni culturali XXX 2014 "Quale sostenibilità per il restauro?" Atti del convegno di studi. Convegno tenuto a Bressanone, Italia, 1-4 luglio 2014* (pp. 867-877). Venezia: Edizioni Arcadia Ricerche.

Orme, M., & Leksmono, N. (2002). *AIVC Guide 5: Ventilation Modelling Data Guide*. AIVC.

Pazold, M., Antretter, F., & Hermes, M. (2014). Coupling hygrothermal whole building simulation and air-flow modelling to determine strategies for optimized natural ventilation. *AIVC Proceedings. 35th AIVC Conference 2014*.

Pickles, D., McCaig, I., & Wood, C. (2015). *Traditional Windows: Their Care, Repair and Upgrading*. Historic England. Da <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/traditional-windows-care-repair-upgrading/heag039-traditional-windows.pdf/>.

Pisello, A.L., & Cotana, F. (2014). Thermal-energy performance of high reflective tiles in historic buildings. Prestazioni termo-energetiche di una tegola ad elevata riflettanza per edifici storici. In *Historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. Convegno tenuto a Roma, 26-28 febbraio 2014*.

UNI EN 15251:2008. Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

CONCLUSIONI _ CONCLUSIONS

Le prestazioni energetiche dell'architettura storica e le possibilità del loro miglioramento dipendono strettamente dalle peculiarità di ciascuna costruzione. Anche in contesti piuttosto omogenei, infatti, la varietà delle soluzioni tecniche storiche, e soprattutto le esigenze di conservazione e i vincoli di tutela, non consentono di individuare strategie di miglioramento compatibile adoperando il grado di generalizzazione possibile per gli edifici di più recente realizzazione.

Tuttavia, analizzare l'influenza che i caratteri ricorrenti dell'architettura storica locale hanno sulle sue prestazioni energetiche è un passo preliminare essenziale per tracciare linee d'indirizzo normativo e per favorire la diffusione di un approccio al progetto di recupero dell'edificio storico che miri a raggiungere, nel rispetto del suo valore culturale, un'efficienza energetica quanto più possibile elevata.

Un tale quadro conoscitivo deve spaziare dalla scala degli elementi tecnici all'interazione degli edifici con il contesto che li circonda. Esso, anche attraverso il riferimento a casi esemplari o edifici rappresentativi, deve descrivere le caratteristiche termiche e igrometriche dei materiali e dei componenti propri della tradizione costruttiva locale, esaminare l'influenza dei caratteri

The energy performance of the historic architecture and its possible improvement strictly depends on the features of each construction. Indeed, also in quite homogeneous contexts, the variety of historic solutions and, especially, conservation needs and normative constraints do not allow to identify compatible improvement strategies by using the possible generalization level usable for recent buildings.

However, analysing the influence of the recurrent features of local historic architecture on its energy performance is an essential preliminary phase before setting appropriate normative guidelines. It is also important in order to favour the spread of an approach to the restoration of historic architecture, aiming at achieve the highest possible energy efficiency while respecting the building cultural value.

This framework of knowledge has to range from the technical elements scale to the building interactions with the surrounding context. It has to describe the thermal and hygrometric features of the materials and components typical of the local tradition, also by means of exemplary cases or representative buildings. Moreover, this general framework has to examine the

dimensionali, distributivi e morfologici ricorrenti, proporre criteri ed esempi progettuali che individuino soluzioni ammissibili di miglioramento energetico. La ricerca esposta contribuisce a costruire tale quadro di conoscenze per il contesto palermitano.

Un abaco di riferimento locale per le caratteristiche termofisiche dei materiali e degli elementi tecnici degli edifici storici, che renda conto delle variazioni prestazionali connesse alle principali soluzioni costruttive e allo stato di conservazione dei componenti, permetterebbe una valutazione di massima dell'efficienza energetica, utile per condurre analisi a vasta scala e definire politiche d'intervento, ma sarebbe anche un opportuno strumento per la progettazione, soprattutto in ragione delle difficoltà connesse alla diagnosi energetica delle costruzioni storiche.

Per il patrimonio architettonico di Palermo, la realizzazione di questa raccolta potrebbe avvantaggiarsi dei molti studi esistenti sui caratteri materici e costruttivi dell'architettura storica locale e delle informazioni desumibili dai documenti d'archivio e dai cantieri di restauro. Aggiungendo a questi delle campagne mirate di diagnosi energetica, si potrebbero analizzare i materiali, i componenti d'involucro e le loro connessioni dal punto di vista delle proprietà termiche, igrometriche e di permeabilità all'aria.

Di quest'ambito, le misure condotte nella presente ricerca affrontano un aspetto, quello delle prestazioni termiche delle murature. Per queste le incertezze derivanti dai dati termofisici a oggi disponibili, non specifici per il contesto palermitano e fra loro parzialmente discordi, sono rilevanti.

Le indagini strumentali svolte non sono sufficienti a definire dei risultati di carattere ge-

influence of dimension, distribution and morphology recurrent features and to suggest design criteria and examples identifying compatible energy improvement solutions. The research exposed in this thesis contributes to set this framework for the context of Palermo.

A local collection of thermo-physical data concerning the characteristics of historic building materials and technical elements should consider the performance variations linked to the main construction solutions and to the conservation state of envelope components. In this way, a data collection would allow a general evaluation of the building energy efficiency. Moreover, it would be useful to carry out an analysis on a large scale, both to define intervention strategies and to guide the design process, especially because of the difficulties related to the energy diagnosis of historic buildings.

For the architectural heritage of Palermo, the development of this data collection could be favoured by existing studies on material and construction elements of the local historic architecture and by data coming from archive documents and restoration activities. Adding to them specific campaigns of energy performance diagnosis, a study on materials, envelope components and connections in terms of thermal, hygrometric and airtightness properties, might be performed.

The measures carried out during this research deal with the thermal performances of stone walls. Particularly, there is a significant uncertainty coming from currently available thermo-physical data, not specific for Palermo's context

nerale, ma forniscono alcune interessanti indicazioni. Infatti le misure di conducibilità termica svolte su tre conci di calcarenite conchiliare mostrano già un buon accordo con la correlazione lineare che la norma UNI 10351:2015 propone fra la conducibilità termica e la massa volumica dei "tufi"; i valori determinati in laboratorio se ne scostano in misura compresa fra -8,3% e +4,2%. Di contro, il confronto con i dati desunti per le pietre calcaree dalla UNI EN 1745:2012, o equivalentemente per le rocce sedimentarie dalla UNI EN ISO 10456:2008, mostra che questi inducono una sovrastima consistente delle effettive proprietà dei campioni, in misura compresa fra il 12,7% e il 38,4%.

Analoghe considerazioni possono dedursi dalle misure di conduttanza termica svolte per le murature del complesso monumentale di Sant'Anna alla Misericordia, che hanno riguardato pareti, di spessore compreso fra 0,5 e 1 m, realizzate con apparecchi e calcareniti differenti nell'arco temporale compreso tra la fine del XV e quella del XVIII secolo. Anche in questo caso, i valori di trasmittanza termica ricavati dalle misure mostrano un buon accordo con i risultati di calcolo basati sui dati della UNI 10351, rispetto ai quali lo scostamento oscilla fra -5% e il +16%. I calcoli che fanno riferimento alle altre norme citate, invece, inducono a sovrastimare la trasmittanza termica delle murature indagate in misura compresa fra +10% e +39%.

Alla stregua delle raccolte di valori di riferimento per le proprietà termofisiche di materiali e componenti tecnici, anche studiare l'influenza dei caratteri d'insieme dell'edificio storico sulle prestazioni energetiche e sull'efficacia delle misure d'intervento ammissibili

and partially discordant among one another.

The instrumental research carried out is not sufficient to produce general results, but provides some interesting indications. The thermal conductivity measurements performed on three calcarenite specimens indicate a close agreement with the linear correlation proposed by the technical standard UNI 10351:2015 between thermal conductivity and density of "tufi"; the measurement values range between -8,3% and +4,2% respect to it. Differently, the comparison with data concerning soft limestones coming from UNI EN 1745:2012, or the comparison with data concerning sedimentary rocks coming from UNI EN ISO 10456:2008, indicate that they produce an overestimation of specimens properties, between 12,7% and 38,4%.

Similar remarks can be made after analysing the thermal conductance measurements carried out for the walls of the monumental complex of "Sant'Anna alla Misericordia". These measurements were performed on walls 0,5 to 1 m thick, built with several techniques and calcarenites over a period of time from the end of the XV to the end of the XVIII century. Also in this case, the thermal transmittance values indicate a close agreement with calculation results based on UNI 10351 data, with a range between -5% and +16%. On the contrary, the calculations referred to the other technical standards which have been cited produce an overestimation of the investigated wall thermal transmittance, ranging from +10% and +39%.

As for the collection of reference values for the thermo-physical properties of materials

pare contraddittorio rispetto all'assunto di partenza dello studio. Se infatti riferirsi alle peculiarità di una costruzione è essenziale perché il miglioramento energetico sia compatibile con le esigenze della conservazione, le semplificazioni che accompagnano una descrizione per categorie edilizie sembrano preludere a risultati generici.

Il metodo proposto dal progetto EFFESUS non è stato impiegato per definire *a priori* le prestazioni energetiche dell'architettura storica di Palermo o per codificare soluzioni di miglioramento. È stato adoperato invece per esaminare i caratteri dimensionali, aggregativi e morfologici del patrimonio storico indagato e quantificarne gli aspetti ricorrenti.

L'adattamento al contesto palermitano non è consistito solo nel conformare i parametri indagati ai dati disponibili, alle peculiarità del costruito storico locale e ai vincoli di tutela per esso vigenti. Si è ipotizzato, in questa ricerca, che le indicazioni distributive e aggregative sottese alle tipologie edilizie della normativa cittadina sull'architettura storica potessero essere adoperate per indagare, di quest'ultima, le prestazioni energetiche attuali e potenziali. La descrizione per categorie proposta, che non è intesa come alternativa alle tipologie esistenti bensì le rivisita, dimostra la possibilità di questa integrazione. Infatti, nel caso del "mandamento" Castellammare, per il quale è stata sviluppata, l'analisi ha avuto come esito un numero contenuto di categorie, dodici, che racchiudono quasi interamente il campione edilizio indagato. Il metodo, dunque, è suscettibile di essere esteso all'intero patrimonio cittadino. Data la sostanziale omogeneità che connota l'edificato storico dell'antica città murata, le categorie utili a

and technical components, also studying the influence of the whole building features on its energy performances and on the effectiveness of compatible interventions seems to be contradictory respect to the beginning assumption of the study. Referring to the building peculiarities is essential to make energy improvement compatible with preservation needs, and simplifications linked to building categories seem to prevent imprecise results.

The method suggested by the EFFESUS project has not been used to define the energy performance of Palermo's historic architecture a priori or to codify improvement solutions. It has been used, on the contrary, to examine dimension, aggregation and morphology features of the investigated architectural heritage and to quantify its recurrent aspects.

The application to the context of Palermo has not consisted only in aligning the parameters to available data, local historic construction peculiarities and current constraints. It has been assumed that the information about building distribution and aggregation, laid down in the current regulation typologies about historic architecture, could be used to investigate its current and potential energy performances. The proposed categorisation, not intended as an alternative but as a restatement, shows the possibility of this integration. Indeed, for what concerns the mandamento Castellammare, the analysis has yielded a limited number of categories, twelve, including almost entirely the investigated building stock. Hence, the method is likely to be extended to the entire Palermo's architectural heritage. Because of the

descrivere richiederebbero poche modifiche rispetto a quelle definite per il “mandamento” Castellammare. Ulteriori categorie sarebbero invece certamente necessarie per le architetture un tempo esterne alla città, non solo per le loro peculiarità morfologiche e distributive ma soprattutto per il differente tessuto urbano nel quale si trovano inserite.

Le categorie edilizie proposte permettono, con un numero contenuto di architetture rappresentative, di analizzare l'efficacia delle misure di miglioramento energetico in ragione di aspetti dimensionali, distributivi e morfologici e la loro applicabilità in base alle prescrizioni della normativa cittadina esistente. Esse costituiscono dunque uno strumento per mezzo del quale esaminare l'integrazione fra l'efficienza energetica del costruito storico, le pratiche consolidate del recupero e le modalità d'intervento ammesse dalle norme vigenti. In quest'ottica, si è ritenuto preferibile, anziché far riferimento ad archetipi ideali, scegliere per ciascuna categoria un edificio rappresentativo reale. Infatti tener conto delle sue peculiarità, che in modo diverso sono presenti in tutte le costruzioni storiche, permette di evidenziare restrizioni e spunti per il miglioramento prestazionale.

L'approfondimento svolto per tre edifici rappresentativi, scelti in base ai caratteri identificativi delle rispettive categorie, è affetto dall'impossibilità di procedere a un'indagine strumentale delle loro caratteristiche e quindi alla calibrazione e alla verifica dei modelli informatici utilizzati. Ciononostante, le simulazioni hanno messo in luce limiti e potenzialità del metodo adoperato nella ricerca, quindi possibili linee di sviluppo dello studio.

substantial homogeneity of the historic constructions inside the ancient town walls, the categories useful to describe it would require few changes respect to the ones defined for the mandamento Castellammare. Further categories would be certainly necessary for the architectures which once were outside the town, not only for their morphology and distribution peculiarities, but mainly for the different urban fabric where they are inserted.

Considering a limited number of representative architectures, the building categories here proposed allow to analyse the effectiveness of energy improvement measures and their applicability according to the requirements of the existing town legislation. Therefore, they represent an instrument to examine the integration between energy efficiency of historic constructions, the restoration practices and the ways of intervention admitted by the current regulation. In this respect, it is preferable to choose a real representative building for each category, rather than refer to ideal archetypes. Indeed, referring to its peculiarities, which are present in almost all historic constructions, allow to underline restrictions and suggestions for performance improvement.

The detailed study performed for three representative buildings, chosen according to their respective category characteristics, is affected by the impossibility to carry out an instrumental investigation of their features and to calibrate and verify the used informatic models. However, the simulations performed have showed limits and potentialities of the research method and

Le modellazioni, che esaminano i benefici termici connessi a vari interventi di miglioramento dell'involucro, mostrano che le prestazioni termiche delle costruzioni indagate sono lontane da condizioni di benessere, sia nel periodo di riscaldamento sia in quello di raffrescamento. Esse evidenziano che interventi facilmente integrabili nelle pratiche del recupero, come il miglioramento della resistenza degli infissi e della loro tenuta all'aria o l'isolamento termico della copertura, riducono in misura sensibile il fabbisogno energetico dell'edificio. Al contempo, suggeriscono alcuni ambiti di approfondimento, ad esempio in merito alla relazione fra l'impiego di rivestimenti riflettenti per le superfici vetrate e di copertura, l'estensione superficiale dei componenti, la loro esposizione solare, il contesto circostante.

Le modellazioni dei tre edifici evidenziano i limiti che le semplificazioni di una descrizione per categorie porta con sé. In essa, infatti, non si considerano l'esposizione solare delle costruzioni, il loro stato di conservazione, la destinazione d'uso, che influenzano grandemente le possibilità d'intervento e i requisiti di qualità ambientale interna. Al contempo, come le tre costruzioni scelte evidenziano, la descrizione per categorie permette d'indagare le differenze attinenti a molteplici aspetti, dal numero e conformazione delle unità immobiliari alle possibilità d'impiego degli spazi comuni per la ventilazione naturale, dall'estensione delle fronti su spazi esterni agli apparati decorativi.

Queste differenze lasciano campo per l'approfondimento di importanti questioni che, tralasciate nelle simulazioni condotte in questo studio, potrebbero essere oggetto di ul-

the possible fields of further studies.

The modellings, examining thermal benefits related to several envelope improvement works, show that the thermal performances of the studied buildings are far from comfort conditions, both for heating and air conditioning period. They show that works which are easy to integrate in the restoration practises, such as the improvement of window thermal resistance and airtightness or roof insulation, considerably reduce the building energy demand. At the same time, these modellings suggest some topics for further studies, for example the correlation of reflecting coatings for glass surfaces and roof tiles with the surface extension of components, their solar exposure, the surrounding context.

The models of the three buildings underline the limits related to the categorisation method. The solar exposure of buildings, their preservation state and their intended use, although greatly influencing the possibility of intervention and the indoor environmental quality, are not considered. At the same time, as for the three chosen constructions, the categorisation allows to investigate the differences concerning many aspects, such as the number and structure of building units, the use of common spaces for natural ventilation, the envelope extension, the existing decorations.

These differences suggest a detailed study on important aspects left out in the simulations performed in this research. These aspects include air-conditioning systems improvement strategies, the

teriori ricerche. Oltre a una valutazione della qualità ambientale interna in luogo delle sole condizioni termiche, questi aspetti includono le strategie di miglioramento degli impianti di climatizzazione, l'impatto della qualità luminosa sui consumi energetici, l'influenza di destinazioni d'uso diverse da quella residenziale, la comparazione fra i risparmi energetici conseguibili in base a differenti condizioni di degrado dell'edificio.

Infine, gli interventi indagati dovrebbero essere analizzati e confrontati alla luce dei costi economici e dell'impatto ambientale connesso al loro ciclo di vita.

Per l'architettura aulica, in misura maggiore rispetto a quella di minor pregio, il prevalere dei caratteri peculiari della fabbrica su quelli ricorrenti della categoria edilizia limita la possibilità di astrarre indicazioni di carattere generale. Soprattutto per tali edifici, un'analisi dettagliata è essenziale per valutare in modo affidabile le prestazioni energetiche e individuare la strada per un miglioramento compatibile. Anche per essi, tuttavia, informazioni, criteri ed esperienze utili per progettare e valutare interventi di recupero sempre più complessi possono derivare da un quadro generale di conoscenze come quello che questa ricerca contribuisce a definire per il patrimonio storico palermitano.

impact of light quality on energy consumption, the influence of building uses different from the residential one, the comparison among energy savings related to different conditions of building decay, and an estimation of the indoor environmental quality instead of just thermal conditions.

Finally, the energy improvement measures investigated should be analysed and compared in the light of their cost effectiveness and their life cycle environmental impact.

For what concerns monumental architecture, more than the vernacular one, the prevailing of the building specific features on the recurrent characteristics of the categories limit the possibility to suggest general indications. Especially for these constructions, a detailed analysis is essential to reliably assess their energy performance and to find the right path towards a compatible improvement. However, also for monumental constructions, criteria and experiences useful to design and evaluate more and more complex restoration measures may result from a general framework of knowledge such as the one this research contribute to define for the historic architecture of Palermo.

